

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2	Akustische Felder und energetische Betrachtung im Hochfrequenzbereich	7
2.1	Mathematische Modellierung von Fluidschall im ruhenden, quellfreien Medium	7
2.2	Klassische numerische Verfahren zur Lösung des Randwertproblems	10
2.2.1	Finite-Elemente-Methode	10
2.2.2	Boundary-Elemente-Methode	12
2.3	Hochfrequenzmethoden	14
2.3.1	Ray Tracing	14
2.3.2	Statistische Energie Analyse	15
2.4	Energie-Methoden	16
2.4.1	Die Energieflussgleichung	17
2.4.2	Die modifizierte Energieflussgleichung	20
2.4.3	Der Intensity-Potential-Approach	21
3	Grundlagen der Energie-Boundary-Elemente-Methode	23
3.1	Diskussion der Energiemethoden und Auswahl einer Variante	23
3.2	Die energetische Randintegralgleichung	30
3.3	Randbedingungen	35
3.4	Berücksichtigung von Inhomogenitäten	36
4	Diskretisierung und Aufstellen des Gleichungssystems	39
4.1	Klassische Diskretisierung mittels Lagrange-Elementen	39
4.1.1	Geometriediskretisierung	40
4.1.2	Interpolation der Randwerte	41
4.1.3	Aufbau des Gleichungssystems mittels der Kollokationsmethode	43

4.2	Isogeometrische Analyse	45
4.2.1	B-Splines und NURBS	46
4.2.2	NURBS-Flächen	50
4.2.3	NURBS-Ansatzfunktionen in der BEM	51
4.2.4	Definition von Kollokationspunkten und Vorgabe von Randwerten	55
4.3	Lösung des Gleichungssystems	56
4.4	Ergebnisse	57
5	Numerische Integration	65
5.1	Reguläre Integration	66
5.2	Singuläre Integration	68
5.2.1	Polarkoordinatentransformation	69
5.2.2	Reparametrisierung	71
5.3	Quasi-Singuläre Integration	72
5.3.1	Unterteilung des Integrationsgebiets	73
5.3.2	Die sinh-Transformation	74
5.3.3	Quasi-singuläre Integration innerhalb eines Patches	76
5.3.4	Vergleich der Verfahren zur quasi-singulären Integration	77
6	Die Fast-Multipole-Methode als Beschleunigungsverfahren in der EBEM	83
6.1	Multipole-Entwicklung	84
6.2	Algorithmus	85
6.3	Imaginäre Argumente der Besselfunktionen für die FM-EBEM	89
6.4	Operatoren	91
6.5	Ergebnisse	92
7	Anwendung der Methode	99
7.1	Monopolquelle im Freifeld	99
7.2	Monopolquelle im Innenraum	102
7.2.1	Modellbildung	102
7.2.2	Referenzlösung	103
7.2.3	Ergebnisse	104
7.3	Lautsprecher-simulation im Innenraum	106
7.3.1	Fahrzeugmodell und Prüfstand	107
7.3.2	Lautsprechermodellierung	108
7.3.3	EBEM Modell	109
7.3.4	Ergebnisse	112
7.4	Diskussion und Fazit	115

8 Zusammenfassung und Ausblick	117
8.1 Zusammenfassung	117
8.2 Ausblick	119
A NURBS-Parametrisierung der Kreisfläche und analytische Lösungen der Integrale	121
A.1 NURBS-Kreisfläche	121
A.2 Quasi-singuläres Integral normal zum Patch	121
A.3 Quasi-singuläres Integral in Patch-Ebene	122
A.4 Singuläres Integral	123
B Geometrie des Fahrzeuginnenraummodells	125
Literaturverzeichnis	127