

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xvii
Nomenklatur	xix
Kurzfassung	xxxi
Abstract	xxxv
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Wissenschaft und Motivation der Arbeit	3
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	8
2 Numerische Strömungsmechanik	11
2.1 Strömungsmechanische Grundgleichungen	11
2.2 Turbulenz und Turbulenzmodellierung	15
2.2.1 Phänomenologische Beschreibung von Turbulenz .	16
2.2.2 Turbulenzmodellierung	21
2.2.3 Skalenauf lösende Turbulenzmodelle	30
2.2.4 Hybride Turbulenzmodelle	35
3 Aeroakustische Grundlagen	41
3.1 Homogene Wellengleichung	41
3.2 Hybride Berechnungsmethoden der Aeroakustik	43
3.2.1 Lighthills akustische Analogie	44
3.2.2 Ffowcs-Williams und Hawkings Gleichung	46
4 Entstehungsmechanismen des Mündungsgeräusches von Fahrzeugabgasanlagen	53
4.1 Frequenzielle Zusammensetzung des Mündungsgeräusches	54
4.2 Akustische Funktionsweise von Fahrzeugabgasanlagen . .	59
5 Untersuchungsparameter und Versuchsaufbau	63
5.1 Generische Untersuchungsmodelle	63
5.2 Definition der untersuchten physikalischen Randbedingungen	71

5.3	Prüfstandsaufbau und verwendete Messtechnik	75
5.3.1	Stationärer Massenstrom	75
5.3.2	Pulsierender Massenstrom	82
6	Konfiguration der CAA-Simulationen	87
6.1	Allgemeine Diskretisierungsparameter der Strömungssimulationen	87
6.1.1	Rechengebiet und physikalische Randbedingungen	88
6.1.2	Gittergenerierung	89
6.1.3	Räumliches Diskretisierungsschema	98
6.1.4	Zeitliche Diskretisierung	99
6.2	Nicht-reflektierende numerische Berandungen	103
6.2.1	Charakteristische nicht-reflektierende Randbedingungen	107
6.2.2	Absorbierende Randbedingungen mittels impliziter Dämpfungszonen	108
6.3	Kopplung zwischen Strömungssimulation und FW-H-Akustiklöser	112
7	Mündungsgeräusch bei stationärem Massenstrom	115
7.1	Akustikfeld in Abhängigkeit von Machzahl und Geometrie	115
7.1.1	Mündungsgeräusch des geraden Rohres	116
7.1.2	Mündungsgeräusch der Expansionskammern	137
7.2	Geschwindigkeits- und Turbulenzfeld der verschiedenen Geometrien	157
7.2.1	Strömungsprofil an der Mündung	158
7.2.2	Strömungsfeld im Freistrahrl	162
7.3	CAA-Simulationen des geraden Rohres	169
7.3.1	Strömungsfeld mit Standard-DES Konfiguration . .	170
7.3.2	Einfluss der FW-H-Kopplungsmethode auf das Akustikergebnis	181
7.3.3	Akustikfeld mit Standard-DES Konfiguration	188
7.3.4	Ergebnisse mit künstlich reduzierter Wirbelviskosität im gesamten Freistrahlbereich	193
7.3.5	Einfluss des Strömungsprofils am Rohraustritt . . .	201

7.3.6	Ergebnisse mit künstlich reduzierter Wirbelviskosität im initialen Grenzschichtbereich	206
7.3.7	Ergebnisse mit WMLES und synthetischer Turbulenz	215
7.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse der CAA-Simulationen des geraden Rohres	230
7.5	CAA-Simulation der großen Expansionskammer	232
8	Mündungsgeräusch bei pulsierendem Massenstrom	247
8.1	Akustikfeld in Abhängigkeit von Motordrehzahl und Geometrie	247
8.1.1	Einfluss der Motordrehzahl auf das Mündungsgeräusch des geraden Rohres	250
8.1.2	Einfluss der Expansionskammern auf das Mündungsgeräusch	254
8.2	CAA-Simulationen des geraden Rohres	259
9	Zusammenfassung und Ausblick	267
9.1	Untersuchungsaktivitäten und wichtigste Ergebnisse	267
9.2	Ausblick	273
Literatur		274
Anhang		293
A	Mündungsgeräusch des geraden Rohres	295
A.1	Ähnlichkeitsspektren LSS und FSS als Einzelspektren	295
A.2	Ähnlichkeitsspektren LSS und FSS als Superposition	296
B	Mündungsgeräusch der Expansionskammern	299