

Dipl.-Phys. Frieder Kunz, Neustadt

Aerodynamische Geräusche von Abgasanlagen

Reihe **7**: Strömungstechnik

Nr. **325**

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung und Motivation	3
3	Geräuscharten in Schalldämpfern	4
3.1	Verbrennungsgeräusch / Pulsation	4
3.2	Oberflächenabstrahlung	5
3.3	Strömungsrauschen	6
3.3.1	Verursachung im Schalldämpfer	7
3.3.2	Verursachung im Endrohr	7
4	Grundlagen	8
4.1	Einleitung	8
4.1.1	Ungleichmäßige Ausströmung	8
4.1.2	Umströmung von Hindernissen	9
4.1.3	Turbulente Strömung	9
4.2	Geräuschgesetz	10
4.3	Lighthills Analogie	13
4.4	Lösungen der inhomogenen Wellengleichung	15
4.4.1	Geschwindigkeitsabhängigkeit freier Wirbelquellen	15
4.4.2	Geschwindigkeitsabhängigkeit von Monopolquellen	17
4.4.3	Geschwindigkeitsabhängigkeit von Dipolquellen	18
4.5	Dipole in Kanälen	18
4.5.1	Kanäle unendlicher Länge	18
4.5.2	Kanäle endlicher Länge	23
5	Meßprozedur	25
5.1	Einleitung	25
5.2	Überprüfung des Geräuschgesetzes	26
5.2.1	Meßeinrichtungen	26
5.2.2	Messungen	27
5.2.3	Ergebnisse	28
5.2.4	Schlußfolgerungen zum Geräuschgesetz von Grundmann	33
5.3	Meßprozedur und Prüfstand	36
5.3.1	Beschreibung des Strömungsrauschenprüfstandes	36
5.3.2	Meßeinrichtungen	36
5.3.3	Durchführung der Messung und Auswertung	37

6	Quantifizierung der Geräuschquellen	38
6.1	Einleitung	38
6.2	Parameterstudie gebogene Endrohre	38
6.2.1	Planung der Studie	39
6.2.2	Durchführung der Experimente	41
6.2.3	Auswertung	42
6.2.4	Zusammenfassung	46
6.3	Parameterstudie Innenaufbau	47
6.3.1	Experimentalschalldämpfer	47
6.3.2	Versuchsaufbau	48
6.3.3	Gemessene Konfigurationen	49
6.3.4	Coherent Output Power	50
6.3.5	Auswertung	52
7	Berechnungsansatz	56
7.1	Lösungsansatz	57
7.2	Integration in bestehende Software	58
7.2.1	Schalldruck und Impedanz der Strömungsgeräuschquelle	58
7.2.2	Ablauf der Berechnung	58
7.3	Vergleich Rechnung / Messung	60
7.3.1	Abgasanlage mit leeren Töpfen und geraden Rohren	60
7.3.2	Abgasanlage mit einfachen Innenaufbauten	60
7.3.3	Abgasanlage mit komplexen Innenaufbauten	60
A	Lineare Akustik	63
A.1	Frequenzbereich	63
A.2	Modellannahmen	63
A.3	Transfermatrix	64
A.4	Eingangsimpedanz und Transferfunktion	66
A.5	Schallquelle und Mündungsgeräusch	66
A.6	Überlagerung akustischer Signale	67
B	Schalldämpferzeichnungen	70
	Literaturverzeichnis	74

Verwendete Zeichen und Abkürzungen

Name	Bedeutung	Einheit
Λ	mittlere freie Weglänge	
α	Winkel in 6.1, Exponent der Reynoldszahl in 4.4	°
β	Winkel in 6.1, Exponent der Machzahl in 4.4	°
β	Exponent der Strouhalzahl $St^{\beta/10}$	
γ	Exponent der Machzahl Ma^γ	
λ	Wellenlänge	m
η	Akustischer Umsetzungsgrad	
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_0	Ruhedichte	$\frac{kg}{m^3}$
ρ'	Dichteschwankung $\rho' = \rho - \rho_0$	$\frac{kg}{m^3}$
δ_{ij}	Kronecker-Delta; 1 für $i = j$, 0 sonst	
$\delta(x)$	Dirac-Delta $\delta(x) = 0$ für $x \neq 0$; $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) = 1$	
κ	Konstante	
μ	dynamische Viskosität	$\frac{kg}{m \cdot s}$
ν	kinematische Viskosität	$\frac{m^2}{s}$
τ_{ij}	Spannungstensor	$\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$
ζ	Druckverlustbeiwert	
ω	Kreisfrequenz	rad/Hz
A	Querschnittsfläche	m^2
D	Charakteristische Länge	m
COP	Coherent Output Power, kohärenter Schalldruck	dB
He	Helmholtzzahl D/λ	
$K(St)$	Strouhalabhängiger Anteil des Quellenspektrums	
L_p	Schalldruckpegel, Referenz: $2 \cdot 10^{-5} Pa$	dB
L_W	Schalleistungspegel Ref: $10^{-12} Watt$	dB
L_{US}	Spezifisches Schallumsetzungsmaß	dB
Ma	Machzahl U/c	
P_{ij}	Tensor der Reibspannungen	$\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$
Re	Reynoldszahl	
Q_m	Massenstromquellstärke	$\frac{kg}{m^3 \cdot s}$
S	Oberfläche	m^2
St	Strouhalzahl $St = fD/U$	

VIII

Name	Bedeutung	Einheit
T	absolute Temperatur	K
T_0	Umgebungstemperatur 293 K	
T_{ij}	Lighthill Spannungstensor	$\frac{N}{m^2} \frac{kg}{m \cdot s^2}$
U	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m^3
W	Abgestrahlte Schalleistung	Watt
Z_0	Spezifische Impedanz ρc	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
b	siehe Abschnitt 4.4	
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
c_0	Schallgeschwindigkeit im Ruhezustand	m/s
f	Frequenz	$Hz = \frac{1}{s}$
f_i	Wechselkraftdichtevektor in 4.2 und 4.3	$\frac{N}{m^3}$
f_i	Kraft pro Masseneinheit in 4.5	$\frac{N}{kg} = \frac{m}{s^2}$
$g(x y)$	Greensfunktion	
k	Wellenzahl	$\frac{rad}{m}$
m	siehe Abschnitt 4.4	
p	Druck	Pa
p_0	Ruhedruck	Pa
p'	Druckschwankung $p' = p - p_0$	Pa
p'_k	Frequenzanteil der Druckschwankung p'	Pa
r	Abstand	m
$u(f)$	Akustischer Volumenstrom	$\frac{m^3}{s}$
u_i	Volumenstromvektor	$\frac{m^3}{s}$
v_i	Teilchengeschwindigkeitsvektor	m/s