

**Bestimmung akustischer Kenngrößen
an einem fahrzeugunabhängigen Prüfstand
zur Modellierung der Schallentstehung
und Schallausbreitung in Fahrzeugklimaanlagen**

vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. Kai Pies

aus Mainz am Rhein

Kaiserslautern, 2011

D 386

Tag der mündlichen Prüfung:	28. Januar 2011
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Böhle
	Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann

SAM-Fortschrittsberichte

Band 5

Kai Pies

**Bestimmung akustischer Kenngrößen
an einem fahrzeugunabhängigen Prüfstand
zur Modellierung der Schallentstehung
und Schallausbreitung in Fahrzeugklimaanlagen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0626-1

ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Aus einer langjährigen Zusammenarbeit des Fahrzeugherstellers BMW und der Arbeitsgruppe Akustik am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen der TU Kaiserslautern entstand ein Projekt, das Untersuchungen von strömungstechnischen und akustischen Phänomenen in Fahrzeugklimaanlagen mit dem Ziel der Geräuschkürzung zur Aufgabe hatte. Grundlegende Erkenntnisse daraus habe ich im Rahmen meiner Dissertation zusammengetragen und weiter entwickelt.

Ich möchte mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken. Ermöglicht wurde die Arbeit zum einen durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, der nach der Übernahme des Lehrstuhls im Jahr 2008 uneingeschränkt die Fortsetzung meiner Arbeit förderte, zum anderen durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter-Heinz Hellmann, der mich mit seinem hohen Erfahrungsschatz stets unterstützte. Beiden Herren bin ich sehr zu Dank verpflichtet.

Ganz besonderen Dank möchte ich Herrn Dr. Manfred Fallen aussprechen, der mich über fast 10 Jahre hinweg am Lehrstuhl betreut hat. Von ihm habe ich über das Fachliche hinaus sehr viel lernen können. Ohne seine Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Die Arbeit wurde von Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali in seiner aktiven Zeit bei BMW nicht nur initiiert, sondern fachlich und inhaltlich entscheidend geprägt. Ich möchte ihm für die vielen Stunden des fachlichen Diskurses danken, die wir zusammen verbracht haben.

Einen großen Anteil am Gelingen der Arbeit und der Durchführung der Versuche verdanke ich meinen Diplom- und Studienarbeitern sowie hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern Nico Germann, Stefan Kluck, Dirk Bonnert, Jochen Dieter, Paul Lyttek, Pol Daleiden, Matthias Grunenberg und Pascal Berndt.

Letztlich möchte ich meiner Verlobten Pamela Knittel für die vielen Stunden danken, die ich in unserer Freizeit für diese Arbeit verwendet habe. Mit ihrer großen Geduld und viel Verständnis hat sie indirekt einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Ihr möchte ich daher auch diese Arbeit widmen.

Inhaltsverzeichnis

I.	FORMELVERZEICHNIS	IV
II.	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IX
III.	SUMMARY.....	XI
1.	EINLEITUNG	1
2.	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....	5
2.1	OBJEKTIVE BEWERTUNG DER INNENGERÄUSCHQUALITÄT	6
2.2	MESS- / AUSWERTEVERFAHREN UND PRÜFSTANDSKONZEPTE.....	7
2.3	SCHALLAUSBREITUNG UND ABSTRAHLUNG AN DER ROHRMÜNDUNG.....	11
2.4	DÄMPFUNG IN KANÄLEN UND ROHRLEITUNGEN.....	12
3.	ZIEL DER ARBEIT.....	13
4.	THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	15
4.1	DIE SCHALLFELDGLEICHUNG IN ZYLINDERKOORDINATEN	15
4.2	DIE SCHALLFELDGRÖßEN IN LEITUNGEN.....	22
4.3	DIE SCHALLFELDGLEICHUNGEN IN LEITUNGEN	23
4.4	DAS WELLENLEITERPRINZIP (DARSTELLUNG ALS SCATTERING-MATRIX).....	27
4.5	DIE TRANSFERMATRIZENMETHODE.....	29
4.6	ENERGIEFLUSS	32
4.7	SCHALLAUSBREITUNG IN GERADEN STETIGEN LEITUNGSABSCHNITTEN	33
4.8	SCHALLAUSBREITUNG IN LEITUNGEN MIT UNSTETIGKEITEN	35
4.9	AUSBREITUNGSDÄMPFUNG UND DURCHGANGSDÄMMUNG	35
4.9.1	Einfügungsdämpfungsmaß D_e (Insertion Loss – IL).....	37
4.9.2	Durchgangsdämpfungsmaß D_d (Transmission Loss – TL).....	38
4.10	ABSTRAHLUNG AM LEITUNGSABSCHLUSS.....	39
4.10.1	Reflexion und Mündungskorrektur.....	39
4.10.2	Offene Leitungsabschlüsse	46
4.10.3	Ausströmer	47
4.11	SCHALLENSTEHUNG AN KLIMAAANLAGEN	48
4.12	EMISSIONSKENNWERTE VON VENTILATOREN UND STRÖMUNGSKANÄLEN	48
4.12.1	Ventilatorgeräusche	48
4.12.2	Strömungsgeräusche in Kanälen	50

5.	PRÜFSTANDSKONZEPTE UND VERSUCHSAUFBAUTEN	55
5.1	MESSUNGEN IM FAHRZEUG.....	57
5.2	BESTIMMUNG DES VOLUMENSTROMS IN LEITUNGEN.....	59
5.2.1	Aufbau zur Kalibrierung von Volumenströmen in Leitungen.....	60
5.2.2	Durchführung und Ergebnisse von Volumenstrommessungen.....	63
5.3	SUBSYSTEMPRÜFSTAND „LEISE LUFT“ MIT AKUSTISCHER ANREGUNG	71
5.4	REFLEXIONSFREIE ABSCHLÜSSE.....	75
5.5	AUFBAU ZUR BESTIMMUNG VON „POWER FLUX“, R UND L*	77
5.5.1	Mikrofonapplikation und Bestimmung eines geeigneten Mikrofonabstands	78
5.6	PRÜFSTAND ZUR ERMITTLUNG VON EMISSIONSKENNWERTEN EINER DROSSELKLAPPE.....	80
5.7	TRANSFERMATRIZENPRÜFSTAND.....	81
6.	ERGEBNISSE	83
6.1	MESSUNGEN IM FAHRZEUG.....	83
6.1.1	Theoretische Überlegungen	83
6.1.2	Versuchsplanung / -durchführung	84
6.1.3	Ergebnisse und Diskussion	84
6.2	MESSUNGEN AM PRÜFSTAND ZUR BESTIMMUNG AKUSTISCHER GRÖßEN.....	89
6.2.1	Theoretische Überlegungen	90
6.2.2	Versuchsplanung / -durchführung	94
6.2.3	Ergebnisse und Diskussion	95
6.3	BESTIMMUNG VON TRANSFERMATRIZEN UND ABLEITBAREN PARAMETERN	101
6.3.1	Theoretische Überlegungen	101
6.3.2	Versuchsplanung / -durchführung	110
6.3.3	Ergebnisse und Diskussion	111
6.4	BESTIMMUNG VON AKUSTISCHEN QUELLEIGENSCHAFTEN	116
6.4.1	Theoretische Überlegungen	117
6.4.2	Versuchsplanung / -durchführung	117
6.4.3	Ergebnisse und Diskussion	119
6.5	ERMITTLUNG STEHENDER WELLEN	125
7.	1-D-MODELL ZUR AUSBREITUNGSBERECHNUNG IN LEITUNGEN.....	127
7.1	AUFBAU DES AKUSTISCHEN VIERPOLMODELLS.....	128
7.2	EINBINDEN VON QUELLTERMEN IN DAS MODELL	129
7.3	ABSTRAHLUNG AM KANALABSCHLUSS	130
7.4	ABSTRAHLUNG ÜBER DIE KANALWÄNDE	131

7.5	DURCHFÜHRUNG DER BERECHNUNG IM KANAL	131
7.6	SIMULATION DES SCHALLFELDES IN LEITUNGEN	132
8.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	135
9.	LITERATURVERZEICHNIS	139
9.1	STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN	148
9.2	NORMEN UND RICHTLINIEN	149
10.	ANHANG	151
10.1	KALIBRIERZEUGNISSE ZUR MIKROFONPHASENANPASSUNG	151
10.2	PARAMETERÜBERSICHT DER ÜBERTRAGUNGSELEMENTE	153
10.3	PHASENGÄNGE DER TRANSFERMATRIZEN VERSCHIEDENER ELEMENTE.....	154
10.4	REFLEXIONSFAKTOR EINES AUSSTRÖMERS MIT UND OHNE WABENPROFIL.....	157
10.5	BILDER	157
10.5.1	Bilder von Prüfstandsaufbauten.....	157
10.6	LEBENSLAUF	160

I. Formelverzeichnis

A	Querschnittsfläche	m ²
A _L	Laufradfläche	m ²
APS ₁₁	Autopowerspektrum des Messkanals 1	dB
C	Kapazität	F
CPS ₁₂	Kreuzleistungsspektrum von Messkanal 2 zu Messkanal 1	dB
D _d	Durchgangsdämpfungsmaß	dB
D _e	Einfügungsdämpfungsmaß	dB
E	E-Modul	N/m ²
E _R	E-Modul der Rohr- bzw. Kanalwandung	N/m ²
E _{Fl}	Kompressibilität des Fluids	N/m ²
F	Frequenz	Hz
I	Schallintensität	W/m ²
L	Länge, Mikrofonabstand	m
L	Induktivität	H
Δl	Mikrofonabstand, Spacerabstand	M
K ₀	Korrekturterm für Temperatur und Luftdruck	dB
L	Pegel	dB
L _A	Schallintensitätspegel	dB
L _{Li}	Innerer Intensitätspegel im Kanal	dB
L _p	Schalldruckpegel	dB
L _s	Messflächenmaß	dB
L _{US}	Schallumsetzungsmaß	dB
L _w	Schalleistungspegel	dB

L_{WA1}	Gesamtschalleistung eines Lüfters	dB(A)
L_{WA2}	Gehäuseschalleistung eine Lüfters	dB(A)
L_{WA3}	Ansaugschalleistung eines Lüfters	dB(A)
L_{WA4}	Ausblassschalleistung eines Lüfters	dB(A)
$L_{W,i}$	Innerer Schalleistungspegel im Kanal	dB
$L_{W,mit\ Einbau}$	Schalleistungspegel im Kanal mit Prüfling	dB
$L_{W,ohne\ Einbau}$	Schalleistungspegel im Kanal ohne Prüfling (mit Substitutionskanal)	dB
Ma	Machzahl	/
P_d	durchgelassene Schalleistung	dB
P_i	Schalleistung am Eintritt vor Prüfling	dB
Pr	Prandtlzahl	/
R	Elektrischer Widerstand	Ω
R_K	Krümmerradius	m
R_R	Rohrschalldämmmaß	dB
R_Z	Resistanz	$kg/(m^2 \cdot s)$
Sh	Scherwellenzahl	/
T	Temperatur	K
T	Transfermatrix	/
T_i	Element i der Transfermatrix	/
V	Volumen	m^3
X, Y	Zufallsvariablen (Merkmale) der Messreihen x_i und y_i	/
X_Z	Reaktanz	$kg/(m^2 \cdot s)$
Y_0	Akustische Flussimpedanz	$1/(m \cdot s)$
$Y_{Abschluss}$	Abschlussimpedanz	$1/(m \cdot s)$

VI

Z	Impedanz	kg/(m ² ·s)
Z ₀	Akustische Feldimpedanz	kg/(m ² ·s)
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
c _p	Spezifische Wärme bei konstantem Druck	J/(kg·K)
d _i	Innendurchmesser	m
f	Frequenz	Hz
f _m	Oktavmittenfrequenz	Hz
h	Höhe	M
j	Imaginäre Einheit	/
k	Wellenzahl	1/m
k ₊ , k ₋	Wellenzahl der in + / -Richtung laufenden Schallwelle	1/m
l	Länge	m
l*	Mündungskorrektur	m
p	(Schall-)druck	Pa
p ⁺	Schalldruck einer Welle in positiver Richtung	Pa
p ⁻	Schalldruck einer Welle in negativer Richtung	Pa
p _n	Schalldruck an der n-ten Mikrofonposition	Pa
p _s	Druck	Pa
q	Schallfluss	[kg/s]
r	Radius	m
r, r ₀	Reflexionsfaktor	/
s	Wandstärke	m
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
v _a	Strömungsgeschwindigkeit in der Abzweigung	m/s
v _h	Strömungsgeschwindigkeit im Hauptkanal	m/s

v_U	Umfangsgeschwindigkeit eines Laufrades	m/s
x	1. Koordinate des kartesischen Koordinatensystems	/
y	2. Koordinate des kartesischen Koordinatensystems	
z	3. Koordinate des kartesischen Koordinatensystems	

Ω	Kreisfrequenz	Hz
α	Dämpfungskoeffizient	dB/m
α^*	Dämpfungskoeffizient	1/m
α_D	Dimensionslose Durchflusszahl	/
β	Wichtungsfaktor	/
γ	Machzahlexponent	/
γ	Spezifische Wärmehzahl	/
γ_{nm}	Verteilungsparameter	/
ϕ	Geschwindigkeitspotential	/
ζ	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von Ungleichförmigkeiten	/
ζ_L	Widerstandsbeiwert eines Luftdurchlasses	/
η	Zähigkeit (dynamische Viskosität)	kg/(m·s)
η'	Hilfsgröße für Gleichung 4-66	kg/(m·s)
η''	Hilfsgröße für Gleichungen 4-68, 4-69 und 4-70	kg/(m·s)
θ	Phasenwinkel	°
κ	Kompressionsmodul	Pa
λ	Wellenlänge	m
λ_L	Leistungszahl	/
ν	Wärmeleitfähigkeit	J/(m·s·K)

VIII

π	Kreiszahl	/
ρ, ρ_0	Dichte	kg/m ³
φ	Lieferzahl	/
χ	Adiabatexponent	/
ψ	Druckzahl	/
ω	Kreisfrequenz	[Hz]

II. Abkürzungsverzeichnis

AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen, Prof. Dr. Hans List
BEM	Boundary-Element-Methode
CFD	Computational Fluid Dynamics
FEM	Finite-Elemente-Methode
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
NALS	Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik
power flux	Englischer Begriff für den Schallintensitätsfluss
RA	Reflexionsarmer Abschluss
SD	Schalldämpfer

III. Summary

While in the past the noise of the engine and other ancillary components of vehicles decreased, other components like the HVAC system have become more and more important. In upper class vehicles the aerodynamic noise of the air-conditioning system at high level might be annoying to the passengers. Modifications made at the late stage of the development phase are often very expensive. Therefore, it is more profitable to carry out tests and acoustic measurements related to both the whole HVAC system and single components at the early stage of the conception phase.

This doctoral thesis presents the theoretical background of sound propagation in duct systems. Methods for determining the transfer matrices of HVAC elements, termination impedances, reflection coefficients and sound source characteristics are introduced. In addition to that, empirical approaches for calculating sound source characteristics of induct elements are presented.

The experimental determination of acoustic characteristics is a main aim of this work. Therefore, different test benches are needed. An important aspect of these test benches is the examination of test objects independent of any vehicle. With this requirement test benches for the application of whole HVAC systems as well as several elements (e.g. ducts, bends etc.) were developed and validated.

For a plane wave propagation the sound field in a duct system can be derived using transfer matrices. The value of these matrices of various sections and built-in components were determined by using a transfer matrix test bench.

Another important parameter of HVAC systems is the termination impedance of air openings inside the vehicle. It is fundamental to describe the proportion of sound being emitted into the interior of a vehicle.

Another test bench was developed, accounting for the necessary source characteristics and providing the following features: a defined air flow of “silent” air and sound excitation by using a noise source. The emission characteristic values obtained during these measurements can be implemented into a calculation model in relation to parameters, such as flow rate or position of the valves. In addition to the fan, which is regarded as a primary sound source, flow-induced noise also occurs at valves, bends and air openings, and thus it also has to be taken into consideration for the description of the overall noise characteristics.

Based on the results obtained by the measurements, a sound propagation model is derived. If this sound propagation is mainly one-dimensional, the acoustic transfer matrix model can be applied to simulate the transmission characteristics. Due to the research results obtained in this doctoral

thesis, it is possible to implement the sound source approach into the transfer matrix description of duct systems.

With the measurements results of the terminating impedances the sound propagation within an HVAC system from the fan through the flow ducts, including valves, bends and other elements, to the drivers position outside the system is possible. The characteristics of the several components are described by transfer matrices, terminating impedances and sound source properties that result from measurements.