

Carolyn Feldmann

Ein psychoakustisches Prognosemodell für die Geräuschqualität lufttechnischer Geräte mit niedrigem Schalleistungspegel

Ein psychoakustisches Prognosemodell für die Geräuschqualität lufttechnischer Geräte mit nied- rigem Schalleistungspegel

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Carolin Feldmann, M.Sc.

geb. am 26.05.1988 in Attendorn

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2018

Betreuer und erster Gutachter
Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus
Universität Siegen

Zweiter Gutachter
Prof. Dr. Steven van de Par
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Tag der mündlichen Prüfung: 13.03.2019

Berichte aus der Strömungstechnik

Carolin Feldmann

**Ein psychoakustisches Prognosemodell
für die Geräuschqualität lufttechnischer Geräte
mit niedrigem Schallleistungspegel**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Siegen, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6678-4

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Kurzfassung

Thema der Arbeit ist die Charakterisierung und Vorhersage der psychoakustischen Geräuschqualität lufttechnischer Geräte, die typischerweise sehr niedrige Schallleistungspegel aufweisen. Stellvertretend werden die vier Geräteklassen „Wärmepumpe“, „Luftreiniger“, „Klima- und Wohnungslüftungsgerät“ betrachtet.

Zunächst wurde mit Hilfe von Hörversuchen ein spezieller semantischer Raum aus Adjektivpaaren bestimmt, mit denen lufttechnische Geräte beschrieben und bewertet werden können. Die Adjektivpaare ließen sich in eine Reihe weniger Wahrnehmungsdimensionen gruppieren, die als „Bewertung“, „Tonhöhe“, „Zeitstruktur“, „Leistungsstärke“ und „hoher Klang“ bezeichnet wurden. Mit der Hypothese, dass Adjektivskalen, die in der evaluativen Wahrnehmungsdimension „Bewertung“ enthalten sind, allein die Geräuschqualität messen und potentiell abhängig sind von den übrigen Wahrnehmungsdimensionen, ergab sich, dass die beiden deskriptiven Wahrnehmungsdimensionen „hoher Klang“ und „Zeitstruktur“ am höchsten mit der Wahrnehmungsdimension „Bewertung“ korrelierten. Eine Korrelation dieser beiden relevanten Wahrnehmungsdimensionen mit psychoakustischen Empfindungsgrößen wiederum führte zu dem Schluss, dass die Schärfe als guter Deskriptor des „hohen Klanges“ sowie eine korrigierte Rauigkeit und die Shannon-Entropie als Deskriptoren für die „Zeitstruktur“ herangezogen werden können.

Da sich drei Probandencluster herauskristallisierten, wurden schließlich drei Modelle in Form linearer Regressionsmodelle für die Geräuschqualität als Funktion der Einflussgrößen Lautheit, Schärfe, Tonhaltigkeit und Shannon-Entropie formuliert. Die neuen Modelle erlauben eine Prognose der psychoakustischen Geräuschqualität aus einer einfachen akustischen Messung. Auch kleinere Unterschiede im Spektrum sowie bestimmte Charakteristika von Geräuschen, die mit deren Zeitstruktur zusammenhängen, können damit aufgelöst werden.

Abstract

Focus of this thesis is the characterization and prediction of the psychoacoustic sound quality of air handling devices with a typically low sound power level. The four classes “heat pump”, “air purifier”, “air conditioning”, “ventilation units” are investigated as representative examples.

In a first step a semantic space of adjective pairs are determined via jury tests, describing and evaluating specifically the sound of air handling devices. All adjective pairs could be grouped into five perceptual dimensions which subsequently were named “evaluation”, “pitch”, “time structure”, “power” and “high pitch”. Hypothesizing that adjective scales, which are contained in the dimension “evaluation” are indicative for the sound quality only and are potentially dependent of the remaining dimensions, “high pitch” and “time structure” correlate significantly with the dimension “evaluation”. Eventually, these two dimensions show a high level of correlation with the objective psychoacoustic metrics sharpness as well as the corrected roughness and Shannon entropy, respectively.

Three clusters of subjects emerged in final jury tests. Therefore, three linear, regression based models for the noise quality as a function of loudness, sharpness, tonality and Shannon entropy are given. The new models allow a prediction of the sound quality based on a simple acoustic measurement of the sound pressure. Even small spectral differences as well as certain temporal effects can be detected.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fluid- und Thermodynamik an der Universität Siegen. Das Forschungsprojekt wurde durch das Unternehmen ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG gefördert. Mein Dank gilt der Unterstützung durch ebm-papst, insbesondere Dr.-Ing. Marc Schneider für die zahlreichen fachlichen Gespräche und Ratsschläge.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Carolus für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit sowie die wertvollen Diskussionen. Herrn Prof. Dr. Steven van de Par möchte ich sowohl für die Übernahme des Korreferates als auch für die gute Unterstützung meiner Arbeit weit über meinen Aufenthalt an seinem Lehrstuhl hinaus sehr danken.

Den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Akustik der Carl von Ossietzky Universität, insbesondere Dr. Reinhard Weber, Dr. Stephan Töpken, Dr. Arne Oetjen und Andreas Häußler, danke ich für die vielen wertvollen Diskussionen sowie die sehr angenehme Zusammenarbeit.

Meinen Kollegen am Institut für Fluid- und Thermodynamik danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Teilnahme an zahlreichen Vorversuchen im Rahmen dieser Arbeit.

Besonders möchte ich mich bei meinem Mann Tobias für die Unterstützung bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur.....	VIII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation.....	1
1.2. Generelle Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	4
2. Allgemeine psychoakustische Grundlagen.....	7
2.1. Einführung	7
2.2. Psychoakustische Empfindungsgrößen.....	8
2.3. Hörversuchsmethoden	18
2.4. Systematische und zufällige Fehler	26
3. Geräuschqualitätsmodelle: Von der „unbeeinflussten Lästigkeit“ hin zur produktadäquaten Qualität	29
3.1. Allgemeine Qualitätsmodelle in der Psychoakustik	29
3.2. Ventilatoren und Propeller.....	30
3.3. Klimasysteme in Personenkraftwagen.....	32
3.4. Staubsauger.....	32
3.5. Diskussion und Schlussfolgerung.....	33
4. Auswahl der lufttechnischen Geräte und Hörversuchsmethoden ...	37
4.1. Auswahl der lufttechnischen Geräte	37
4.2. Allgemeiner Ablauf eines Hörversuches	39
4.3. Versuchsumgebung und eingesetzte Hard- und Software	40
4.4. Übersicht der genutzten Hörversuchsmethoden	41
5. Semantisches Differential für lufttechnische Geräte.....	45
5.1. Design des semantischen Differentials für lufttechnische Geräte .	45
5.2. Validierung des semantischen Differentials	48
5.3. Kontexteinfluss auf das semantische Differential.....	54
6. Relevante Wahrnehmungsdimensionen und psychoakustische Empfindungsgrößen für Geräusche lufttechnischer Geräte	65
6.1. Methode	65

6.2.	Ergebnis - Interview	67
6.3.	Wahrnehmungsdimensionen	69
6.4.	Relevante deskriptive Wahrnehmungsdimensionen	73
6.5.	Relevante psychoakustische Empfindungsgrößen	75
6.6.	Fazit.....	76
7.	Zur Wahrnehmungsdimension <i>Zeitstruktur</i>	79
7.1.	Literaturübersicht	79
7.2.	Einordnung der Geräusche von lufttechnischen Geräten.....	80
7.3.	Einfluss tonaler Signaturen auf die Wahrnehmung der Zeitstruktur	82
7.4.	Fazit.....	92
8.	Quantitativer Einfluss der psychoakustischen Empfindungsgrößen auf die Wahrnehmungsdimension <i>Bewertung</i>.....	95
8.1.	Methode	95
8.2.	Prüfung auf Durchführbarkeit der Analyse	98
8.3.	Ergebnis	99
8.4.	Fazit.....	101
9.	Psychoakustisches Prognosemodell für die Geräuschqualität lufttechnischer Geräte	103
9.1.	Regressionsanalyse	103
9.2.	Validierung des Geräuschqualitätsmodells	105
9.3.	Anwendungsbeispiele des Prognosemodells.....	106
10.	Zusammenfassung	111
A.	Anhang A: Hörversuchsumgebungen	113
B.	Anhang B: Versuchsinstruktionen der Hörversuche	117
C.	Anhang C: Fragebögen der Hörversuche.....	131
D.	Anhang D: Wahrnehmungsdimensionen lufttechnischer Geräte ..	135
E.	Anhang E: Studie Geräuschqualität	147

F. Anhang F: Kreuzvalidierung des Prognosemodells für die Geräuschqualität	151
11. Literaturverzeichnis	155
Lebenslauf.....	169

Nomenklatur

Lateinische Zeichen

a	y-Achsenabschnitt in Prognosemodell	-
AI	Artikulationsindex	-
A_i	Tonamplitude	Pa / dB
a_v	Verdeckungsmaß	-
b_N	Vorfaktor der Lautheit N im Prognosemodell	-
b_S	Vorfaktor der Schärfe S im Prognosemodell	-
b_T	Vorfaktor der Tonhaltigkeit T _E im Prognosemodell	-
b_H	Vorfaktor der Shannon Entropie H im Prognosemodell	-
c_B	Vorfaktor in Schärferechnung nach VON BIS-MARCK	-
d_c	euklidische Distanz	-
d	Anzahl zirkulärer Triaden	-
d_{max}	maximal erreichbare Anzahl zirkulärer Triaden	-
df	Freiheitsgrad	-
D	Durchmesser	m
e	Effektgröße	-
$E(d)$	Erwartungswert	-
F	Wert eines statistischen Hypothesentests (F-Test)	-
F	Schwankungsstärke, psychoakustische Empfindungsgröße	vacil
f	Frequenz	Hz
f_m	Modulationsfrequenz	Hz
f_{tr}	Trägerfrequenz	Hz
f_{BPF}	Drehton	Hz

Nomenklatur		IX
$f_{Ton,i}$	Tonfrequenz	Hz
f_{TP}	Filterfrequenz eines Tiefpassfilters	Hz
g	Anzahl Geräusche	-
g	Gewichtungsfunktion zur Berechnung der Schärfe	-
G	Anzahl Geräuschgruppen	-
h	Häufigkeit	-
h_{ij}	Häufigkeit positiver oder negativer Urteile über alle Probanden in einem Dominanzpaarvergleich	-
i	Laufindex	-
j	Laufindex	-
k	Anzahl der Komponenten in der Hauptkomponentenanalyse	-
K	Konsistenzkoeffizient	-
K_A	Klanghaftigkeit nach Aures	tu
K_T	Tonzuschlag nach DIN 45681	dB
L	Pegel	dB
$L_{A,eq}$	energieäquivalenter Dauerschallpegel (A-bewertet)	dB(A)
L_G	Pegel des verdeckenden Rauschens, Berechnung der Tonhaltigkeit nach DIN 45681	dB
L_N	Lautstärkepegel (ISO 226)	phon
L_p	Schalldruckpegel	dB
$L_{p,A}$	A-bewerteter Schalldruckpegel	dB(A)
L_T	Tonpegel, Berechnung der Tonhaltigkeit nach DIN 45681	dB
$L_{T,i}$	Tonpegel des i-ten Tons, i = 1: Grundton, etc.	dB
m	Modulationsgrad	%
n	Anzahl von etwas	-
n	Anzahl Adjektivskalen	-

X		Nomenklatur
n	Drehzahl	U/min
N	Summen- oder Gesamtlautheit, psychoakustische Empfindungsgröße	sone
N'	spezifische Lautheit	sone/Bark
N_0'	Vorfaktor des Lautheitsmodell mit dem Ziel $N = 1$ sone für ein 1 kHz Sinuston bei 40 dB(SPL)	
N_{10}	10-Perzentil Lautheit	sone
Q_i	Geräuschqualität (aus Prognosemodell)	-
p	Schalldruck	Pa
p	Anzahl Personen	-
p	Signifikanzlevel	-
p	Auftrittswahrscheinlichkeit bei der Bestimmung der Shannon Entropie	-
r	bivariater Korrelationskoeffizient nach PEARSON	-
r_p	partieller Korrelationskoeffizient	-
r	Effektgröße (Wilcoxon Test)	-
R	Rauigkeit, psychoakustische Empfindungsgröße	asper
R_A	Rauigkeit nach AURES	asper
R^2_{adj}	Bestimmtheitsmaß	-
R_{corr}	korrigierte Rauigkeit nach Gehörmodell	asper
S	Reiz	-
S	Schärfe nach DIN 45692, psychoakustische Empfindungsgröße	acum
S_A	Schärfe nach AURES	acum
S_B	Schärfe nach VON BISMARCK	acum
S_i	Anzahl dominierender Urteile im Dominanzpaarvergleich	-
t	Zeit	s

T	Tonzuschlag nach DIN 45681	penaltydB
T_A	Tonhaltigkeit nach AURES	tu
T_E	Tonhaltigkeit nach ECMA-74	tuHMS
TNR	Ton-Rausch-Verhältnis	dB
TNR_0	Ton-Rauschverhältnis eines ausgewählten Geräusches zur Bestimmung der „0 dB“ Basislinie; Untersuchung der Tonamplitude in Kap.7	dB
u	Konkordanzmaß	-
$U_{sD,Bewertung}$	mittlere Beurteilung im Hörversuch mit der Methode des semantischen Differentials in der Wahrnehmungsdimension <i>Bewertung</i>	-
$U_{Paarvergleich}$	mittlere Beurteilung des Rangplatzes eines Geräusches im Hörversuch mit der Methode des Dominanzpaarvergleiches	-
$U_{Paarvergleich,L CJ}$	mittlere Beurteilung im Hörversuch mit der Methode des Dominanzpaarvergleiches, transformiert auf Intervallskalenniveau mit dem Law of Comparative Judgement	-
$U_{Ratingskala}$	mittlere Beurteilung im Hörversuch mit der Methode der Ratingskalierung	-
w	Anzahl Wahrnehmungsdimensionen	-
W	Wohlklang nach AURES	tu
x	Geräuschsignal, hier synthetisch erzeugt	Pa
x_n	Rauschen, Anteil des synthetisch erzeugten Geräuschsignals	Pa
x_t	Tonale Komponenten, Anteil des synthetisch erzeugten Geräuschsignals	Pa
z	Schaufelzahl	-
z	Tonheit	Bark
Z	Z-Wert, Teststatistik	-

Griechische Symbole

α	Reliabilitätskriterium nach CRONBACH	-
α	Vorfaktor in der korrigierten Rauigkeit $\alpha = 1$	-
α	Exponent in Stevens Potenzgesetz	-
β	Vorfaktor in der korrigierten Rauigkeit $\beta = 0,8$	-
Δ	Differenz	
φ	Phase eines Signals	°
H	Shannon Entropie, Maß der Zufälligkeit	bit
χ^2	Wahrscheinlichkeitsverteilung in der Statistik	-

Abkürzungen

AES	Digitales Tonformat zur Übertragung von Audiosignalen zwischen verschiedenen Geräten häufig über XLR Stecker (Industriestandard in der Tonstudientechnik)
AM	Amplitudenmodulation
BPF	Blade Passing Frequency, Drehtonfrequenz
EPA	häufig anzutreffende Wahrnehmungsdimensionen „evaluation“, „potency“ und „activity“ nach OSGOOD ET AL.
FM	Frequenzmodulation
KMO	KAISER MEYER OLKIN Kriterium in der Hauptkomponentenanalyse
NRC	Noise Reduction Coefficient, Maß der Absorption von Materialien, NRC = 1: Perfekte Absorption
LCJ	Law of Comparative Judgement, Transformation in höherwertiges Intervallskalenniveau
PC	Personal Computer
sD	semantisches Differential
RMSE	mittlerer quadratischer Fehler, root mean squared error
TA	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm

V	Versuchstermin
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
UBA	unbiased annoyance nach ZWICKER
USB	Universal Serial Bus; Genutzt zur Herstellung einer Verbindung zwischen einem PC und einem externen Gerät
+	positive Beurteilung im Paarvergleich
–	negative Beurteilung im Paarvergleich
Ø	Durchschnitt