

**Erzeugung resonanter Stoßwellen
aus transsonischen Strömungen
zur Anwendung in
fluidischen elektroakustischen Wandlern**

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Marek Dolak
aus Pilsen

Hamburg 2015

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hendrik Rothe
Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Delf Sachau
Tag der mündl. Prüfung: 27. März 2015

Schriftenreihe Laboratorium Mess- und Informationstechnik

Band 14/2015

Marek Dolak

**Erzeugung resonanter Stoßwellen aus
transsonischen Strömungen zur Anwendung
in fluidischen elektroakustischen Wandlern**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3711-1

ISSN 1613-4427

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

„Uns gefällt Ihr Sound nicht,
und Gitarrenmusik ist ohnehin nicht gefragt“¹

¹Ablehnungsgrund der Plattenfirma DECCA® für einen Plattenvertrag der Band „The Beatles“ im Jahre 1962 [70].

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner nebenberuflichen Tätigkeit als externer Doktorand an der Professur für Mess- und Informationstechnik (MIT) der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Doktorvater und Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hendrik Rothe, der mir den größtmöglichen wissenschaftlichen Freiraum, zuvorkommende Unterstützung und unschätzbare Anregungen für meine Arbeit gegeben hat. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Delf Sachau danke ich für die Übernahme des Ko-referats und die fachliche Begutachtung meiner Dissertationsschrift und für die großzügige Leihgabe umfangreicher Messtechnik.

Meiner geliebten Frau Sandra, sowie meinen Kindern Fynn und Hannah danke ich für ihre grenzenlose Geduld, Liebe und Unterstützung, die sie mir während der vergangenen Jahre, trotz manchen Verzichts, entgegengebracht und dadurch maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Großer Dank gebührt meinem Freund, Lehrer und Mentor Prof. Dr. Ronald Edward Brown für seine selbstlose und wohlwollende Freundschaft, die mich über die Jahre nicht nur während meiner akademischen und beruflichen Karriere inspiriert, sondern auch mein Leben bereichert hat.

Den Herrn Dipl.-Ing. Kai Simanowski und TAng. Günter Neuwirth danke ich für die zuvorkommende und kompetente Beratung bei der Auslegung meines Versuchsaufbaus und der damit verbundenen technischen Unterstützung.

Besonders danken möchte ich auch den Herren Wolfgang Kletz, Wolfgang Schmidt und Lothar Butsch für ihre kreative und meisterliche Unterstützung bei der Entwicklung und Herstellung meiner Versuchsapparaturen. Mein Dank gilt auch den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen, Kameradinnen und Kameraden für die hervorragende Zusammenarbeit und die anregenden fachlichen Diskussionen.

In diesem Zusammenhang möchte ich ganz besonders meinem Bruder Dipl.-Phys. Thomas Dolak für die akribische Durchsicht des Manuskripts, den regen Gedankenaustausch, seine profunden Hinweise und die kritische Rezension der vorliegenden Arbeit danken.

Schließlich möchte ich meinen Eltern, Dipl.-Ing. Jan Dolak und Eva Dolak für ihre Liebe und Hingabe danken, die sie mir auf meinem Lebensweg geschenkt haben.

Marek Dolak, Kiel im Dezember 2014

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der prototypischen Entwicklung einer autarken Energiequelle für Luft umströmte Flugkörper, die vollends auf bewegliche Teile, eine drahtgebundene Energieversorgung, sowie chemische Energieträger verzichtet. Solche Energiequellen sind für die wehrtechnische Anwendung, insbesondere bei der Verwendung in Munition, von großem Interesse und hätten immense Vorteile bei der Realisierung sicherer, robuster und wartungsfreundlicher Zündsysteme.

Da ein derartiges Konzept zur Energieversorgung mikroelektronischer Komponenten bisher weder wissenschaftlich, noch technisch untersucht wurde, wird mit dieser Untersuchung praktisch Neuland betreten. Der multidisziplinäre Charakter des Problems berührt hierbei nahezu alle Teilbereiche der klassischen Physik und zeigt sich schwerpunktmäßig in den Themenbereichen der Strömungsmechanik, Akustik, Festkörperphysik und Kurzeitdynamik. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wurde eine methodische Annäherung an das Thema gewählt, die eine möglichst objektive Eingrenzung des breiten Themenfeldes auf wenige Teilaspekte der Problemstellung erlaubt. Die aus dieser Eingrenzung resultierenden Anforderungen dienen der Formulierung von Zielen, deren Erreichung schrittweise durch theoretische und experimentelle Anteile verifiziert und validiert wird.

Hierzu werden zunächst ausgewählte Umwandlungsprinzipien und –prozesse auf ihre Eignung untersucht, hinsichtlich der globalen Kriterien Beherrschbarkeit, Verfügbarkeit und Effizienz bewertet und auf Basis der daraus resultierenden Folgerungen konzeptionell weiterentwickelt. Ausgehend von diesem groben Entwurf (Näherung), wird auf analytischem Wege ein dreistufiges physikalisch-mathematisches Modell erstellt und mittels empirisch ermittelter Leistungsparameter (Vorversuche), sowie einer begleitenden quantitativen und qualitativen Optimierung, in verschiedene Testprototypen überführt. Der Entwurf verschiedener Prototypen zielt dabei nicht ausschließlich auf einen Nachweis der Machbarkeit, sondern dient auch der Betrachtung bisher wenig befriedigend erklärter Phänomene und Ergebnisse im Bereich der Schallemission interagierender Stoßwellen. Aufgrund des Untersuchungsaufwandes bzw. -umfanges, konnte keine geschlossene physikalische Theorie entwickelt werden. Der Hauptaugenmerk liegt darauf, die vorliegenden qualitativen und quantitativen Ergebnisse in einen neuen wissenschaftlichen Kontext bzw. Ansatz zu bringen und zu interpretieren, ohne dabei den Anspruch auf Allgemeingültigkeit zu erheben.

Abschließend werden alle Ergebnisse der Vorversuche den verschiedenen Prototypen-Versuchen gegenübergestellt und diskutiert. Die im Rahmen der Prototypen-Versuche auftretende, und im Hinblick auf die Voruntersuchungen unerwartete Frequenzantwort, ist in Teilen nicht mit dem physikalisch-mathematischen Modell des vorliegenden akustischen Wandlers zu erklären. Diese Tatsache wird in erster Linie auf die einerseits geringe, aber methodisch begründete, empirische Breite und andererseits auf das Fehlen konstitutiver Gesetzmäßigkeiten im Bezug auf die hierin betrachtete Entstehung der Schallemission zurückgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Methode	6
2	Diskussion möglicher EH-Prinzipien	9
2.1	Darstellung möglicher EH-Prinzipien	10
2.1.1	Aeroakustisch	10
2.1.2	Elektromagnetisch	12
2.1.3	Piezoelektrisch	15
2.1.4	Photovoltaisch	18
2.1.5	Thermoelektrisch	22
2.1.6	Photoakustisch	24
2.2	Bewertung der EH-Prinzipien	27
2.3	Folgerung	31
3	Grundlagen zu aerodynamischen Schallerzeugern	33
3.1	Schallerzeugung aus transsonischer Strömung	34
3.1.1	Physik des Freistrahls	35
3.1.2	Resonator im Freistrah	36
3.1.3	Autooszillation und Schallemission	38
3.1.4	Düsengeometrie	41
3.2	Akustische Leistung	42
3.2.1	Schalldruck und Schallschnelle	42
3.2.2	Schallintensität und Schalleistung	43
3.2.3	Abstrahlungscharakteristik	43
3.2.4	Wirkungsgrad	44
3.3	Entkopplung der akustischen Emission vom Luftstrom	45
3.3.1	Piezomembran	45
3.3.2	Elektret	48
3.3.3	Mikroelektronik und Energiemanagement	50

4	Näherungsrechnung	51
4.1	Lavaldüse	52
4.2	Resonator	56
4.3	Stoßwelle und Schallfeld	59
4.4	Elektret	62
5	Analytisch-Numerische Lösung	65
5.1	Lavaldüse	65
5.1.1	Machzahlverlauf und Konturgleichung	68
5.1.2	Modellierung der Lavaldüse	70
5.2	Diskontinuität	71
5.2.1	Berechnung der Zustandsgrößen nahe der Diskontinuität	75
5.2.2	Interaktion beider Verdichtungsstöße	76
6	Vorversuche	79
6.1	Versuchsaufbau	79
6.2	Versuchsdurchführung	82
6.3	Auswertung der Meßergebnisse	84
6.3.1	Meßreihe 1 (5 mm Düse/Resonator)	87
6.3.2	Meßreihe 2 (6 mm Düse/Resonator)	92
6.3.3	Meßreihe 3 (7 mm Düse/Resonator)	98
6.3.4	Meßreihe 4 (7 mm Lavaldüse/Resonator)	104
6.3.5	Meßreihe 5 (Richtcharakteristik)	112
7	Optimierung und Dimensionierung	115
7.1	Optimierung	115
7.1.1	Qualitative Optimierung	116
7.1.2	Quantitative Optimierung	118
7.2	Dimensionierung	122
7.2.1	Konstruktionsparameter	123
7.2.2	Laborbedingungen	124
8	Prototypischer Entwurf eines Elektroakustischen Wandlers	127
8.1	Testprototyp I	127
8.1.1	Versuchsaufbau & -durchführung	127
8.1.2	Versuchsauswertung	130
8.2	Testprototyp II	131
8.2.1	Versuchsaufbau	131
8.2.2	Versuchsdurchführung	133
8.2.3	Versuchsauswertung	134
9	Zusammenfassung	141
10	Ausblick und zukünftiger Forschungsbedarf	145

A	Versuchsaufbau	147
A.1	Düsen/Resonatoren Vorversuche & TP I	148
A.2	Testprototyp II	150
A.3	Brüel & Kjær LAN-XI Frontend (Type 3160)	151
A.4	Brüel & Kjær Array Microphone (Type 4958)	152
A.5	G.R.A.S. Probe Microphone (Type 40SC)	153
A.6	Jun-Air Kompressor - Typ 6/25	155
A.7	DurusWhite (FullCure430)	156
A.8	Vorversuchsaufbau	157
A.9	Versuchsaufbau TP II	169
B	Messdaten - Vorversuche	175
B.1	Messreihe 1: Veränderung des Abstandes bei konstantem Druck	176
B.2	Messreihe 1: Veränderung des Drucks bei konstantem Abstand	185
B.3	Messreihe 2: Veränderung des Abstandes bei konstantem Druck	188
B.4	Messreihe 2: Veränderung des Drucks bei konstantem Abstand	192
B.5	Messreihe 3: Veränderung des Abstandes bei konstantem Druck	195
B.6	Messreihe 3: Veränderung des Drucks bei konstantem Abstand	199
B.7	Messreihe 4: Veränderung des Abstandes bei konstantem Druck	203
B.8	Messreihe 4: Veränderung des Drucks bei konstantem Abstand	207
	Literaturverzeichnis	211
	Abbildungsverzeichnis	218
	Tabellenverzeichnis	220

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	SI-Einheit
A	Fläche	$[m^2]$
A_0	Amplitude der harmonischen Schwingung	$[m]$
b	Dämpfungskonstante	$[kgs^{-1}]$
$\vec{B}$	magnetische Flußdichte	$[kgs^{-2}A^{-1}]$
C	elektrische Kapazität	$[m^{-2}kg^{-1}s^4A^2]$
C_0	spezifische el. Kapazität	$[m^{-4}kg^{-1}s^4A^2]$
c	Schallgeschwindigkeit	$[ms^{-1}]$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$[m^2s^{-1}K^{-1}]$
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$[m^2s^{-1}K^{-1}]$
$D_{\text{Düse}}$	Durchmesser der Düse/Austrittsquerschnitt LD	$[m]$
D_M	Membrandurchmesser	$[m]$
D_{Res}	Durchmesser des Resonators	$[m]$
d_{ij}	piezoelektrischer Ladungskoeffizient, richtungsabhängig	$[As^3m^{-1}kg^{-1}]$
d_F	Foliendicke	$[m]$
d_M	Membrandicke	$[m]$
E	Energie	$[m^2kgs^{-2}]$
$\vec{E}$	Elektrische Feldstärke	$[mkg s^{-3}A^{-1}]$
E_B	Bandlückenenergie	$[m^2kgs^{-2}]$
E_E	Elektrische Energie einer Solarzelle	$[m^2kgs^{-2}]$
E_{EA}	Gesamtenergie der angeregten Elektronen	$[m^2kgs^{-2}]$
E_{EM}	Gesamtenergie der elektromagnetischen Strahlung	$[m^2kgs^{-2}]$
E_P	Energie eines Photons	$[m^2kgs^{-2}]$
E_S	Strahlungsenergie der Sonne auf der Erdoberfläche	$[m^2kgs^{-2}]$
e	Elementarladung, $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$[As]$
$\mathcal{F}$	Freiheitsgrad des n-atomigen Gases	$[-]$
F	Kraft	$[mkg s^{-2}]$
F_V	Vorspannkraft	$[mkg s^{-2}]$
f	Frequenz	$[s^{-1}]$

f_0	Resonanzfrequenz	$[s^{-1}]$
h	Plancksches Wirkungsquantum, $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	$[m^2 kgs^{-1}]$
I	elektrische Stromstärke	$[A]$
$\vec{I}$	Schallintensität, vektorielle Größe	$[kgs^{-3}]$
$\vec{j}$	Stromdichte, vektorielle Größe	$[Am^2]$
K	<i>Lighthill</i> -Parameter	$[-]$
k	Federkonstante bzw. -steifigkeit	$[m^{-2} kgs^{-2}]$
k^2	Kopplungsfaktor	$[-]$
k_B	<i>Boltzmann</i> -Konstante, $\sigma \approx 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$	$[m^2 kgs^{-2} K^{-1}]$
$\mathcal{L}$	Länge Instabilitätsbereich	$[m]$
$L_{\text{Düse}}$	Länge der Düse	$[m]$
L_p	unbewerteter Schalldruckpegel	$[dB]$
L_{Res}	Länge des Resonatorhohlraumes	$[m]$
M	molare Masse	$[kgmol^{-1}]$
Ma	Machzahl	$[-]$
m	Masse	$[kg]$
m	Steigung der Trendlinie	$[-]$
$\dot{m}$	Massestrom	$[kgs^{-1}]$
n	Stoffmenge	$[mol]$
n	Zählindex	$[-]$
P	Leistung	$[m^2 kgs^{-3}]$
$\mathcal{P}$	Polarisation, vektorielle Größe	$[Asm^{-2}]$
p	Druck	$[m^1 kgs^{-2}]$
$\hat{p}$	Schalldruck	$[m^1 kgs^{-2}]$
Q	<i>Seebeck</i> -Koeffizient	$[m^2 kgs^{-3} A^{-1} K^{-1}]$
Q	Wärme	$[m^2 kgs^{-2}]$
Q_p	p-Quantil $Q_p = [0 \dots 1]$	$[-]$
R	Abstand zur Schallquelle eines Kugelstrahlers (Kugelradius)	$[m]$
$R_{i,j}$	Korrelationskoeffizient	$[-]$
r	Radius	$[m]$
$\mathcal{S}$	Korrekturfaktor Strahlaufweitung (Düsenmündung)	$[-]$
s_{ij}	elastische Nachgiebigkeit, richtungsabhängig	$[m]$
T	Temperatur	$[K]$
T_n	Temperatur bei Normalbedingungen, $T_n = 273,15 \text{ K}$	$[K]$
t	Zeit	$[s]$
U	elektrische Spannung	$[m^2 kgs^{-3} A^{-1}]$
U_K	Kontaktspannung	$[m^2 kgs^{-3} A^{-1}]$
u	Strömungsgeschwindigkeit, Partikelgeschwindigkeit	$[ms^{-1}]$
V	Volumen	$[m^3]$
v	Geschwindigkeit, allgemein	$[ms^{-1}]$
$\hat{v}$	Schallschnelle	$[ms^{-1}]$
x	konstruktiver Justierbereich Düse-Resonator	$[m]$
x, y, z	Ortskoordinaten des kartesischen Koordinatensystems	$[m]$

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	SI-Einheit
α	Fasenwinkel	[°]
β	Dämpfungsgrad	[—]
Γ	spezifische Kompressionsarbeit der ausströmenden Luft	[$m^2 s^{-3}$]
ϵ_{th}	thermische Energiedichte	[$m^{-1} kg s^{-2}$]
ϵ_F	Fermienergie	[eV]
ϵ_{ij}	Permittivität des Piezomaterials, richtungsabhängig	[s^{-1}]
η	Wirkungsgrad	[—]
η_C	Carnot-Wirkungsgrad	[—]
η_{SQ}	<i>Schockley-Queisser</i> -Wirkungsgrad	[—]
θ	Abstrahlungs- bzw. Elevationswinkel zur Strömungsachse	[°]
κ	Adiabatensexponent/Isentropensexponent, Stoffkonstante	[—]
λ	Wellenlänge	[m]
μ	chemisches Potential	[$m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$]
ν	Frequenz des Photons	[s^{-1}]
ξ	Modales Dämpfungsverhältnis des mech. Schwingungssystems	[—]
Φ	magnetischer Fluß	[$kg m^2 A^{-1} s^{-2}$]
$\Delta\Phi$	Potentialdifferenz	[$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$]
ϕ	Azimutwinkel der Schallabstrahlung	[°]
ϕ_{RLF}	relative Luftfeuchtigkeit	[%]
ρ	Dichte	[$kg m^{-3}$]
σ	spezifische Leitfähigkeit	[$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$]
σ_P	Poissonscher Querkontraktionskoeffizient	[—]
ω	Kreisfrequenz	[s^{-1}]
ω_0	Resonanzfrequenz (siehe auch f_0)	[s^{-1}]

Indizes

Index	Bezeichnung
AA	Mignon-Größe der/des Batterie/Akkumulators nach ANSI
ak	akustisch
C	Baby-Größe der/des Batterie/Akkumulators nach ANSI
C	Carnot
eff	Effektivwert
el	elektrisch
F	Feder, Schraubenfeder
i, j	Koeffizienten- bzw. Komponentenindizes, Richtungsindizes
K	Kesselzustandsgröße (Ruhegröße in Kesselumgebung)
min	Minimalwert
max	Maximalwert
N	Nachstoß-Zustand
S	Eigenschaft der Strömung
U, Umg	Umgebungsbedingung
V	Vorstoß-Zustand
VD	Verdichtung - Verdichtungsstoß (shock wave)
vd	Verdünnung - Verdünnungswelle (rarefaction wave)
th	thermisch
$theo$	theoretisch
0	Ruhezustand unter Normbedingungen
1	Zustand am Eintritt der Lavalldüse (Eingangsgröße)
$*$	Zustand im engsten Querschnitt der Lavalldüse (kritische Zustandsgröße)
2	Zustand am Austritt der Lavalldüse (Ausgangsgröße)
∞	Ruhezustand unter Umgebungsbedingungen
$-$	Arithmetisches Mittel
$\wedge$	Schallfeldgrößen, Abweichung von der Ruhegröße (Index 0)
$\sim$	kritisches Verhältnis

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
AA	Aeroakustisch
ANSI	American National Standards Institute
BAE	Batterieäquivalent
CI	Konfidenzintervall
CL	Konfidenzniveau
CPV	Concentrator Photovoltaic
EAW	Elektroakustischer Wandler
EH	Energy Harvesting
EM	Elektromagnetisch
EMG	Elektromagnetischer Generator
FEL	Freie-Elektronen-Laser
HLSG	Hartmannscher Luftstrahlgenerator
ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
LD	Lavaldüse
LED	Light Emitting Diode
LSG	Luftstrahlgenerator
MEG	Multiple Excitation Generation
MELSC	Multiple Energy Level Solar Cells
MR	Messreihe
NSA	NATO Standardization Agency
OFS	Optical Frequency Shift
PE	Piezoelektrisch
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
PVDF	Polyvinylidenfourid
RLZ	Raumladungszone
RM	Reproduzierbarkeitsmessungen bzw. -messreihe
SA	Empirische Mittelwert mit Standardabweichung
SBSL	Single Bubble Sonoluminescence
SL	Sonolumineszenz
SMM	Studentized Maximum Modulus
SQL	Schockley-Queisser-Limit
STANAG	Standardization Agreement
TE	Thermoelektrisch
TEG	Thermoelektrischer Generator
TS	Test Statistics, Teststatistik, Prüfgröße
VD	Verdichtungsstoß, Diskontinuität