

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 20

Rechnerunter-
stützte Verfahren

Nr. 471

M.Sc. Abtin Jamshidi Rad,
Hamburg

Charakterisierung und Vermessung von nichtlinearen Hochenergie-Druckpuls- Feldern mit einem optischen Mehrkanal- hydrophon



Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Professur für Automatisierungstechnik

Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse

Charakterisierung und Vermessung von nichtlinearen Hochenergie- Druckpuls-Feldern mit einem optischen Mehrkanalhydrophon

**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**

Abtin, Jamshidi Rad

aus Teheran

Hamburg 2017

Gutachter:

Uni.-Professor Dr.-Ing. Klaus Krüger
Professor Dr.-Ing. Friedrich Ueberle

Tag des Abschlusses der mündlichen Prüfung: 20.Oktober 2017

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte
Verfahren

M.Sc. Abtin Jamshidi Rad,
Hamburg

Nr. 471

Charakterisierung
und Vermessung
von nichtlinearen
Hochenergie-Druckpuls-
Feldern mit einem
optischen Mehrkanal-
hydrophon



Professur für Automatisierungstechnik

Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Jamshidi Rad, Abtin

Charakterisierung und Vermessung von nichtlinearen Hochenergie-Druckpuls-Feldern mit einem optischen Mehrkanalhydrophon

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 471. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

152 Seiten, 48 Bilder, 15 Tabellen.

ISBN 978-3-18-347120-1, ISSN 0178-9473,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Ultraschalltherapie – Lithotripsie – Hydrophon – Kavitation – optisches Hydrophon – Entfaltung

Der Druckpuls findet in der Medizin eine breite Anwendung. Er wird z.B. in der Schwangerschaftsvorsorge oder auch zur Behandlung von Nierensteinen eingesetzt. Die dabei applizierten Energien können Nierensteine zertrümmern oder Zellen koagulieren. Für die Gewährleistung der Patientensicherheit und des Therapieerfolges muss eine bessere Grundlage für die Therapieplanung und -kontrolle geschaffen werden. Dazu ist es notwendig, die Parameter, die das Druckpulsfeld charakterisieren, zuverlässig zu bestimmen.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, ein für die Vermessung von Druckpulsfeldern optimiertes optisches Hydrophon nach dem piezooptischen Prinzip zu entwickeln. Der Fokus liegt auf der Verbesserung der Messtechnik und der Erweiterung des Systems auf mehrere simultane Messkanäle. Die Evaluation anhand einer piezoelektrischen, einer ballistischen und einer elektromagnetischen Druckpulsquelle konnte eine verzerrungsfreie Wiedergabe des Druckpulsfeldes bestätigen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at
www.dnb.de.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-347120-1

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger und Prof. Dr.-Ing. Friedrich Ueberle bedanken, die mich während der Bearbeitung meiner Dissertation tatkräftig unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg durch das Studium und die Promotion begleitet haben.

Geleitwort

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die systemtheoretische Analyse komplexer technischer Prozesse betrachtet, einschließlich der darauf aufbauenden Automatisierung. Die erfolgreiche Umsetzung der erzielten theoretischen Ergebnisse, insbesondere im Rahmen der industriellen Wertschöpfung, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

An der Professur für Prozessdatenverarbeitung und Systemanalyse wurde bereits ein breites Spektrum technischer Prozesse mittels mathematischer Methoden systemtheoretisch identifiziert und modelliert. Die resultierenden quantitativen Modelle stellen eine belastbare Basis für die sich anschließende Regelung respektive Automatisierung der Prozesse dar.

Mit der messtechnischen Erfassung nichtlinearer Hochenergie-Ultraschall-Felder hat Herr Dr. Jamshidi Rad ein sehr anspruchsvolles Thema aufgegriffen. Das breite Spektrum an medizinischen Ultraschall-Aktuatoren untermauert die hohe Relevanz des Themas. Dies gilt insbesondere angesichts der eher rudimentären Kenntnisse bezüglich der zugehörigen, ortsaufgelösten Druck-Zeitverläufe. Ausgehend von heute verfügbarer Messtechnik zeigt Herr Dr. Jamshidi Rad zunächst deren Defizite sowie entsprechende Lösungsansätze auf.

Höhepunkt seiner Dissertation sind die Entwicklung und die erfolgreiche Umsetzung eines quasi rückwirkungsfreien Mehrkanal-Hydrophons. Gegenüber den bis heute üblichen Einkanal-Hydrophonen ist damit ein erheblicher technischer Fortschritt erzielt.

Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich Ueberle von der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Bioeffekte des Ultraschalls	4
1.1.1. Thermische Effekte	5
1.1.2. Nichtthermische Effekte	6
1.2. Stand der Druckpulsmesstechnik	6
1.3. Aufgabenstellung	8
1.4. Zielstellung und Leitfaden	9
2. Physikalische Grundlagen der Akustik	11
2.1. Wellenausbreitung	11
2.1.1. Lineare Wellengleichung	12
2.1.2. Nichtlineare Wellengleichung	13
2.1.3. Unterschiede zwischen linearer und nichtlinearer Schallausbreitung .	15
2.2. Schallfeldgrößen und Schallwechselwirkungen	16
2.2.1. Impedanz	16
2.2.2. Schallintensität und Schallleistung	17
2.2.3. Schallreflexion und Schalltransmission	17
2.2.4. Beugung und Streuung	18
2.2.5. Dämpfung und Schallabsorption	20
2.2.6. Schallstrahlungskraft	23
2.2.7. Kavitation	24
2.3. Schallfeldgeometrie	26
3. Physikalische Grundlagen elektroakustischer Wandler	29
3.1. Der piezoelektrische Wandler	29
3.2. Der piezooptische Wandler	30
4. Charakterisierung der akustischen Messtechnik	34
4.1. Eigenschaften eines Hydrophons	35
4.2. Parameter der akustischen Messtechnik	37
4.3. Piezoelektrisches Hydrophon	39
4.3.1. Piezoelektrisches Keramikhydrophon	42
4.3.2. Piezoelektrisches Polymer-Hydrophon	43
4.4. Schallstrahlungswaage	46
4.5. Schlierenoptisches Hydrophon	47
4.6. Das faseroptische Hydrophon	49
4.7. Das Lichtfleck-Hydrophon	53

Inhaltsverzeichnis

5. Signalverzerrung optischer Hydrophone	59
5.1. Elektronische Verzerrungen	59
5.1.1. Übertragungsverhalten des LSHD	60
5.1.2. Filterung der Messsignale	61
5.1.3. Entfaltung der Verzerrungen	63
5.2. Geometrische Verzerrungen	68
5.2.1. Mathematische Entfaltung	70
5.2.2. Experimentelle Entfaltung	71
6. Das optische Mehrkanalhydrophon	74
6.1. Das faseroptische Mehrkanalhydrophon	74
6.2. Das Mehrkanal-Lichtfleck-Hydrophon	77
6.2.1. Anzahl und Position der empfindlichen Flächen	77
6.2.2. Lichtquelle	79
6.2.3. Optische und akustische Eigenschaften des Glasblocks	81
6.2.4. Lokale Beschädigungen am Glasblock	82
6.2.5. Fokussierungsoptik	83
6.2.6. Messungen entlang der Schallausbreitungsachse	87
6.3. Photoempfänger und Verstärkerelektronik	88
6.3.1. Die PIN-Photodiode	90
6.3.2. Der Transimpedanzverstärker	90
6.4. Rauscheinigenschaften	92
6.4.1. Maßnahmen zur Rauschminderung	94
6.4.2. Noise Equivalent Sound Pressure des Mehrkanalhydrophons	96
6.5. Bestimmung der Empfindlichkeit	97
7. Evaluation des Mehrkanalhydrophons und Diskussion	101
7.1. Vermessung der piezoelektrischen Quelle (PiezoClast)	102
7.2. Vermessung der elektromagnetischen Quelle (EMSE)	104
7.3. Vermessung der ballistischen Quelle (DolorClast)	106
7.4. Diskussion und Ausblick	109
Anhang	115
A. Ausblick auf zukünftige piezoelektrische Werkstoffe	115
B. Die elektromagnetische Stoßwellenquelle	116
C. Das Interferometer Hydrophon	119
D. Gleichungen zur Bestimmung der piezooptischen Konstante	121
Literaturverzeichnis	122

Abkürzungsverzeichnis

AR	Anti-Reflex
BMI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energy
cw	Kontinuierliche Welle
DC	Direct Current
EMSE	Elektromagnetische Stoßwellenquelle
ESWL	Extrakorporale Stoßwellen Lithotripsie
ESWT	Extrakorporale Stoßwellentherapie
FASO	Faseroptisches Hydrophon
FOPH	Fiber Optic Hydrophone
FWHM	Full Width Half Maximum
HIFU	High Intensity Focused Ultrasound
IEC	International Electrotechnical Commission
LSHD	Light Spot Hydrophone
MKH	Mehrkanalhydrophon
OPV	Operationsverstärker
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PVDF	Polyvinylidenfluorid
r-ESWT	Radiale Extrakorporale Stoßwellentherapie
ROI	Region of Interest
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and Electronic Equipment
SI	Internationales Einheitensystem

TC87 Technical Committee 87: Ultrasonics
US Ultraschall

Formelzeichenverzeichnis

B/A	Nichtlinearitätsparameter
c	Schallgeschwindigkeit
d	Piezoelektrische Ladungskonstante
$D(\phi)$	Richtcharakteristik
E	Lichtintensität
F	Kraft
f	Frequenz
f_G	Grenzfrequenz
f_R	Relaxationsfrequenz
F_s	Schallstrahlungskraft
g	Piezoelektrische Spannungskonstante
\tilde{I}	Schallintensität
i_n^2	Leistungsdichte
I_{ph}	Photodiodenstrom
i_R	Sperrstrom
i_r	Rauschstrom
i_{SR}	Schrotrauschstrom
i_{Th}	Thermischer Rauschstrom
J	Rauschstromdichte
J_R	Effektivwert des Rauschens
k	Kopplungsfaktor
M	Akustische Machzahl

<i>MI</i>	Mechanical Index
<i>NEP</i>	Noise-Equivalent-Power
<i>NESP</i>	Noise Equivalent Sound Pressure
<i>n</i>	Brechungsindex
<i>n_t</i>	Transformationsverhältnis
<i>n_w</i>	Brechungsindex des Wassers
<i>P</i>	Schallleistung
<i>p</i>	Schalldruck
<i>p_a</i>	Absolutdruck
<i>p₀</i>	Umgebungsdruck
<i>P_{ir}</i>	Relative Intensitätsrauschleistung
<i>P_m</i>	Mittlere Rauschleistung
<i>P_{ph}</i>	Optische Leistung
<i>P_n</i>	Mittelwert der Rauschleistung
<i>P_{rausch}</i>	Gesamtrauschleistung
<i>P_{th}</i>	Thermische Rauschleistung
<i>P_{sr}</i>	Schrotrauschleistung
<i>Q</i>	Elektrische Ladung
<i>R_a</i>	Reflexionsfaktor
<i>Re_{ak}</i>	Akustische Reynoldszahl
<i>S</i>	Empfindlichkeit
<i>s</i>	Verdichtung
<i>S_{ph}</i>	Empfindlichkeit der Photodiode
<i>SNR</i>	Signal-zu-Rausch-Verhältnis
<i>T_a</i>	Transmissionsfaktor
<i>t_r</i>	Anstiegsflanke

X

t_w	Kompressions-Pulsdauer
u_{noise}	Rauschspannung
v	Schallschnelle
x_s	Schockformationsabstand
Z_A	Akustische Impedanz der Anpassungsschicht
Z_W	Akustische Impedanz des Wandlers
Z_G	Akustische Impedanz des Weichgewebes
α_r	Absorptionskoeffizient für die Relaxationsdämpfung
α_v	Absorptionskoeffizient für viskose Dämpfung
β	Koeffizient der Nichtlinearität
χ	Piezooptische Konstante
ϵ	Dielektrizitätskonstante
ϵ_x	Exzentrizität
κ	Kompressibilität
λ	Wellenlänge
∇	Nabla Operator
ϕ	Einfallswinkel
ν	Raman-Nath-Parameter
ω	Kreisfrequenz
ρ	Dichte
ρ_0	Ruhedichte
σ	Mechanischer Stress
ξ	Auslenkung

