

**Messverfahren
zur Charakterisierung
synthetischer
Stimmlippen**

der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Sandra Weiß
aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	13. Mai 2014
Vorsitzende des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
	Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger

Berichte aus der Elektrotechnik

Sandra Weiß

**Messverfahren zur Charakterisierung
synthetischer Stimmlippen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2885-0

ISSN 0945-0718

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Sensorik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Sie wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR894 zum Thema „Strömungsphysikalische Grundlagen der menschlichen Stimmgebung“ gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch für die hilfreiche fachliche Unterstützung selbst bei schwierigen Fragestellungen und die Übernahme des Erstgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger danke ich herzlich für das Interesse an meiner Arbeit, die konstruktiven Diskussionen und die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Sensorik möchte ich für gute Zusammenarbeit und die tolle Arbeitsatmosphäre danken. Ganz besonderer Dank gilt dabei vor allem Herrn Dr.-Ing. Alexander Sutor, der stets ein offenes Ohr hatte und mit fachlichen Hinweisen zum Gelingen der Arbeit beitrug. Außerdem danke ich Frau Ute Bollert, Herrn Manfred Pelz und Herrn Michael Günther herzlich für ihre Unterstützung im Labor.

Des Weiteren bedanke ich mich für die interdisziplinäre Kooperation im Rahmen der Forschergruppe. Allen voran den Mitarbeitern der Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie des Universitätsklinikums Erlangen sowie jenen des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Ein besonderer Dank gilt hier Frau Dr. Anke Ziethe, Frau Veronika Birk, Frau Marion Semmler und Herrn Dr.-Ing. Stefan Kniesburgs für die stetige gegenseitige Unterstützung.

Ich danke den von mir betreuten Studenten Ramona Kremer, Veronika Birk, Johannes Heubeck, Tobias Müller und Christoph Seßler für Ihren Beitrag zu dieser Arbeit.

Abschließend gebührt ein ganz besonderer Dank meinem Freund Frank und meiner Familie, auf deren Unterstützung ich jederzeit zählen konnte und die mir stets Rückhalt gaben.

Fürth, im März 2014

Sandra Weiß

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IX
Abstract	XI
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	2
1.2. Stand der Technik	3
1.2.1. Stimmlippenmodellierung	3
1.2.2. Messmethoden zur Materialcharakterisierung von Stimmlippen	5
1.2.3. Messung der Kollisionskräfte von Stimmlippen	8
1.3. Lösungsansatz	9
1.4. Überblick über den Aufbau der Arbeit	12
2. Synthetische Stimmlippen	15
2.1. Physikalische Grundlagen der menschlichen Stimmgebung	15
2.1.1. Lagebezeichnungen im menschlichen Körper	15
2.1.2. Anatomie der Stimmlippen	16
2.1.3. Stimmlippenschwingung	17
2.1.4. Zusammenfassung der wichtigen Parameter	18
2.2. Verwendetes Material: Silikonkautschuk	18
2.3. Gussformen und Probekörper	20
2.3.1. Stabproben	20
2.3.2. Zylindrische Proben	21
2.3.3. Transversal-isotrope Probekörper	22
2.3.4. Synthetisches Stimmlippenmodell	23
2.4. Strömungskanal	24
3. Analyse des statischen Materialverhaltens von Silikon	27
3.1. Grundlagen des Zugversuchs	27
3.2. Messplatz für Zugversuche	28
3.3. Messfehleranalyse	29
3.3.1. Ungenauigkeiten der Einzelmessgrößen	29
3.3.2. Schwankung der Messwerte	30
3.4. Einfluss des Mischungsverhältnisses	31
3.4.1. Dichte	31
3.4.2. Elastizitätsmodul	32
3.4.3. Querkontraktionszahl	33

3.5.	Einfluss der Alterung	35
3.5.1.	Komponentenalterung	35
3.5.2.	Lagerung der Proben	36
3.6.	Einfluss der Temperatur	38
3.7.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	40
3.8.	Zusammenfassung	40
4.	Analyse des dynamischen Materialverhaltens von Silikon	43
4.1.	Schwingungsmessplatz	43
4.1.1.	Messprinzip	43
4.1.2.	Messaufbau	44
4.2.	Messunsicherheit	45
4.3.	Einfluss des Mischungsverhältnisses	45
4.3.1.	Betragsgang der Übertragungsfunktion	45
4.3.2.	Wiederholgenauigkeit	46
4.4.	Einfluss des Messpunktes	47
4.5.	Einfluss der Temperatur	48
4.6.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	48
4.7.	Inverses Verfahren zur Materialdatenbestimmung	50
4.7.1.	Grundidee des Verfahrens	50
4.7.2.	Nichtlineare Ausgleichsrechnung	50
4.7.3.	Iterativ regularisiertes Gauß-Newton-Verfahren	51
4.7.4.	Ansätze	52
4.7.5.	Simulationsmodell	53
4.7.6.	Parameterstudie	54
4.7.7.	Startwerte	55
4.8.	Ergebnisse für die dynamischen Materialparameter	56
4.8.1.	Materialdaten in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses	58
4.8.2.	Materialdaten in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Luftfeuchte	59
4.9.	Validierung der Materialparameter	60
4.10.	Zusammenfassung	61
5.	Ortsaufgelöste Materialcharakterisierung mittels Pipettenaspiration	63
5.1.	Pipettenmessplatz	63
5.1.1.	Messprinzip	63
5.1.2.	Messaufbau	64
5.2.	Messunsicherheiten	65
5.2.1.	Abhängigkeit der gemessenen Druckamplitude von der Position	65
5.2.2.	Vibrometerempfindlichkeit	67
5.2.3.	Messgeräte	68
5.3.	Einfluss des Mischungsverhältnisses	69
5.3.1.	Auslenkungsprofil	69
5.3.2.	Wiederholgenauigkeit	69

5.3.3.	Einfluss der Anpresskraft	70
5.3.4.	Frequenzgänge	71
5.4.	Materialparameter	72
5.4.1.	Rotationssymmetrisches Simulationsmodell	72
5.4.2.	Parameterstudie	73
5.4.3.	Robustheit der Identifikation	76
5.4.4.	Ansätze und Startwerte	78
5.4.5.	Ergebnisse für die ortsabhängigen Materialparameter	79
5.5.	Untersuchung mehrschichtiger Proben	80
5.6.	Untersuchung transversal-isotroper Materialien	82
5.6.1.	Einfluss der Messposition	82
5.6.2.	Einfluss der Faserdichte	84
5.6.3.	Einfluss der Dehnung und Wiederholbarkeit	85
5.6.4.	Vergleich mit einer Finite-Elemente-Simulation	87
5.7.	Untersuchung unterschiedlicher Pipettengeometrien	91
5.7.1.	Pipettengeometrien	91
5.7.2.	Isotrope Proben	92
5.7.3.	Transversal-isotrope Proben	92
5.7.4.	Parameterstudie	94
5.7.5.	Bewertung der Pipettengeometrien	100
5.8.	Zusammenfassung	100
6.	Gegenüberstellung der Messmethoden zur Materialcharakterisierung	103
6.1.	Messtechnik	103
6.1.1.	Zugversuchsmessplatz	103
6.1.2.	Schwingungsmessplatz	104
6.1.3.	Pipettenmessplatz	104
6.1.4.	Bewertung	105
6.2.	Materialdatenbestimmung	105
6.3.	Zusammenfassung	109
7.	Untersuchung der Schwingungseigenschaften synthetischer Stimmlippen	111
7.1.	Kalibrierung des Strömungskanals	111
7.2.	Wichtige Messgrößen und Schwingungsparameter	113
7.2.1.	Subglottaler Druck	113
7.2.2.	Akustik	113
7.2.3.	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	117
7.3.	Messaufbau	119
7.4.	Stimmlippenmodelle	120
7.5.	Ergebnisse	121
7.5.1.	Subglottaler Druck	121
7.5.2.	Akustik	124
7.5.3.	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	126
7.6.	Beurteilung der Ergebnisse	127

8. Sensorik zur messtechnischen Erfassung der Kollisionskräfte	129
8.1. Aufbau des Sensorarrays	129
8.1.1. Grundlagen der Piezoelektrizität	129
8.1.2. Wandlmaterial	131
8.1.3. Leiterplattenlayout	133
8.2. Charakterisierung der Sensorarrays	134
8.2.1. Bestimmung des Übertragungsverhaltens	135
8.2.2. Empfindlichkeit	135
8.2.3. Linearität	138
8.2.4. Dynamikbereich	139
8.3. Messaufbau	140
8.4. Messergebnisse	141
8.4.1. Einfluss des Strömungsdrucks	142
8.4.2. Interpretation des Signalverlaufs	143
8.4.3. Einfluss der Materialeigenschaften	145
8.4.4. Sensorposition	146
8.5. Beurteilung der entwickelten Sensorik	149
9. Zusammenfassung und Ausblick	151
9.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	151
9.1.1. Stimmlippenmodellierung	151
9.1.2. Simulationsgestützte Materialdatenbestimmung	152
9.1.3. Schwingungseigenschaften der synthetischen Stimmlippen	153
9.2. Ausblick	154
Literaturverzeichnis	156
Symbolverzeichnis	169
Abbildungsverzeichnis	171
Tabellenverzeichnis	175
A. Anhang	179
A.1. Zusätzliche Ergebnisse der Untersuchungen des statischen Material- verhaltens	179
A.1.1. Einfluss der Komponentenalterung	179
A.2. Zusätzliche Ergebnisse der Untersuchungen am Schwingungsmessplatz	180
A.2.1. Einfluss der Temperatur	180
A.2.2. Einfluss der relativen Luftfeuchte	180
A.2.3. Materialdaten	181
A.3. Zusätzliche Ergebnisse der Untersuchungen am Pipettenmessplatz	182