

Biomechanical Analysis Methods for Substitute Voice Production

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Phys. Björn Hüttner
aus Ochsenfurt

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

Tag der mündlichen Prüfung: 17.09.2013

Vorsitzende des

Promotionsorgans:

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rude

Biomechanische Analysemethoden für die Ersatzstimmgebung

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Phys. Björn Hüttner
aus Ochsenfurt

Kommunikationsstörungen - Berichte aus Phoniatrie und
Pädaudiologie

Band 22

Björn Hüttner

**Biomechanical Analysis Methods
for Substitute Voice Production**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2293-3

ISSN 1436-1175

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Meinem Doktorvater und Betreuer Prof. Dr. Michael Döllinger danke ich herzlich für die Aufnahme in seine interdisziplinäre Arbeitsgruppe und die Überlassung des Themas. Ich danke für die Erfahrungen die ich in Wissenschaft und Klinik machen durfte sowie für die Möglichkeit in spannenden Projekten jenseits dieser Arbeit mitzuwirken. Vielen Dank für die wertvolle Unterstützung.

Bei Herrn Prof. Dr. Ulrich Rüde möchte ich mich für die gewährte Unterstützung und die Übernahme des Korreferats bedanken.

Prof. Dr. Dr. Ulrich Eysholdt danke ich für die Aufnahme in seine Abteilung und die hochwertigen Arbeitsbedingungen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen Dr. Anke Ziethe, Denis Dubrovskiy, Simon Petermann und Veronika Birk danke ich für die gute Zusammenarbeit, die angenehme und entspannte Arbeitsatmosphäre sowie die netten Gespräche nebenher, welche den Arbeitsalltag immer wieder aufgelockert haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Kollegen Georg Luegmair. Er hat den Entstehungsprozess der vorliegenden Arbeit unmittelbar miterlebt und konstruktiv unterstützt. Für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen sowie den ständig stattfindenden Wissensaustausch möchte ich mich recht herzlich bedanken. Danke für die vielen sinnvollen und sinnfreien Gespräche, welche wir in den letzten fünf Jahren geführt haben.

Den (ehemaligen) ärztlichen Kolleginnen und Kollegen sowie den Logopädinnen der Abteilung, welche ich aufgrund der Vielzahl nicht namentlich erwähnen kann, danke ich für die Anfertigung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, für die Aufnahme der „*Der Nordwind und die Sonne*“ Texte sowie für die Bewertung der Ersatzstimmen. Bei PD Dr. med. Christopher Bohr und Dorothea Matthies bedanke ich mich für die Präparation der Halbkehlköpfe.

Meinen ehemaligen Kollegen Dr. Daniel Voigt und Dr. Anxiong Yang danke ich für die angenehme Zusammenarbeit.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Jacqueline bedanken, die durch ihr Verständnis und ihre aufgebrachte Geduld stets eine Stütze war. Voller Stolz danke ich auch meinem Sohn Julian, der auf seine ganz spezielle Art und Weise zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie des Universitätsklinikums Erlangen bedanken, die auf unterschiedliche Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und hier nicht namentlich erwähnt sind.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der FOR892/2 der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie Projekt 109204 der Deutschen Krebshilfe gefördert.

„There is nothing like looking, if you want to find something. You certainly usually find something, if you look, but it is not always quite the something you were after.“

„Es geht nichts über das Suchen, wenn man etwas finden will. Zwar findet man bestimmt etwas, aber gewöhnlich ist es durchaus nicht das, was man gesucht hat.“

— J. R. R. Tolkien, *The Hobbit*

Zusammenfassung

Eine gesunde Stimme entsteht im Kehlkopf durch Schwingungen der Stimmlippen. Im Rahmen der onkologischen Therapie von Kehlkopfkrebs kann es - je nach Lage und Schweregrad des Tumors - zu einer vollständigen Entfernung des Kehlkopfes kommen. Dabei werden auch die beiden Stimmlippen entfernt, was den Verlust der Stimme zur Folge hat. Zur Stimmrehabilitation können die Schwingungen des Narben- und Schleimhautgewebes im Übergang von Rachen und Speiseröhre (PE-Segment) zur Ersatzstimmgebung genutzt werden. Die Qualität der Ersatzstimme hängt von den Schwingungen des Tongenerators ab, welche maßgeblich durch die biomechanischen Eigenschaften des Gewebes bestimmt sind. Um den vollständigen dynamischen Umfang der Ersatzstimmgebung zu untersuchen, werden die Schwingungen im PE-Segment während einer nichtstationären Phonation mittels digitaler Hochgeschwindigkeitsendoskopie in Echtzeit erfasst und die Dynamik extrahiert.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Methoden zur Analyse der biomechanischen Eigenschaften des Gewebes im PE-Segment erarbeitet.

Ein numerisches Mehr-Massen-Modell mit zeitabhängigen Modellparametern wird entwickelt, welches die nichtstationären Schwingungen des PE-Segments simuliert. Die Anpassung des Modells an die PE-Dynamik geschieht blockweise durch eine automatische Optimierungsprozedur. Die ermittelten zeitlichen Verläufe der Modellparameter beschreiben die biomechanischen Abläufe im PE-Segment. Die verwendete Zielfunktion ist nicht-konvex, weshalb auf eine Kombination aus einem globalen und einem lokalen Optimierungsalgorithmus zurückgegriffen wird. Das zeitabhängige Modell und die zugehörige Optimierung werden mit zeitabhängigen synthetischen Datensätzen validiert und anschließend auf klinische Daten angewendet. Darüber hinaus wird ein vorläufiger Ansatz zur modellbasierten Bewertung der Schwingungen im PE-Segment erarbeitet und Zusammenhänge zur Qualität der Ersatzstimme aufgezeigt.

Es wird ein Versuchsaufbau für statische Zugversuche an Stimmlippen entwickelt. Werte für die Gewebesteifigkeit werden ermittelt, welche die Tonerzeugung begünstigen. Mit diesem Wissen kann durch zielgerichtete Veränderung der Gewebeeigenschaften im PE-Segment die Qualität der Ersatzstimme positiv beeinflusst werden. Statische Zugkräfte werden an definierten Punkten entlang der Stimmlippenkante eingeleitet und die lokale Steifigkeitsverteilung wird bestimmt. Der Kraftansatz im Muskel oder der Mukosa erlaubt die Vermessung verschiedener Gewebeschichten. Die Deformationsanalyse basiert auf optischer Stereo-Triangulation von aufgenähten Positionsmarkern. Die Funktionalität wird an Schweinestimmklappen demonstriert.

Contents

1	Introduction	1
2	Fundamentals	5
2.1	Anatomy of the Human Larynx	5
2.2	Morphology of Vocal Fold Soft Tissue	9
2.3	Phonation	11
2.4	Voice Disorders	13
2.5	Total Laryngectomy	13
2.5.1	Laryngeal Cancer	13
2.5.2	Surgical Intervention	14
2.6	Substitute Voice Production	15
3	Acquisition of PE-Dynamics	19
3.1	Digital High-Speed Video-Endoscopy	20
3.2	Extraction of PE-Dynamics	22
3.3	Non-Stationary Phonation Paradigm	24
3.4	Biomechanical Modeling	24
4	Modeling of Non-Stationary PE-Vibrations	27
4.1	Time-Dependent Multi-Mass Model: PEM(t)	28
4.2	Applied Forces	30
4.2.1	Anchor Force	31
4.2.2	Vertical Coupling Force	32
4.2.3	Horizontal Coupling Force	33
4.2.4	Collision Force	34
4.2.5	Driving Force	35
4.3	Simulation of Time-Dependent PE-Vibrations	36
4.3.1	Time-Dependent Scaling	37
4.3.2	Model Configuration	38
4.3.3	Generation of Symmetric Time-Dependent PE-Dynamics	38

5	Parameter Optimization Procedure	41
5.1	Automatic Parameter Optimization	41
5.1.1	Block-Based Optimization	42
5.1.2	Adaptation of the Model Configuration	42
5.1.3	Time-Dependent Rest Positions	43
5.1.4	Objective Function	43
5.1.5	Initialization of the Optimization Parameters	47
5.1.6	Optimization Procedure	47
5.2	Validation with Synthetic Data Sets	51
5.2.1	Methodology	51
5.2.2	Results	52
5.2.3	Comparison to other Studies	55
5.3	Application to Real PE-Vibrations	55
5.3.1	Adaptation Results	57
5.3.2	Objective Quantification and Interpretation	63
6	PE-Vibrations and Substitute Voice Quality	67
6.1	Clinical Data	67
6.2	Time-Dependent Modeling of PE-Vibrations	68
6.3	Rating of the Substitute Voice	69
6.4	Model-Based Rating Approach	71
6.5	Preliminary Application to Clinical Data	73
7	Measurement of Vocal Fold Deformations	81
7.1	Fundamentals: 3D Reconstruction	82
7.1.1	The Pinhole Camera Model	82
7.1.2	Lens Distortion	86
7.1.3	Camera Calibration	86
7.1.4	Stereo-Triangulation	86
7.2	Static Tensile Test Setup	88
7.3	3D Marker Reconstruction	91
7.4	Investigation of 3D Deformation Characteristics	91
7.5	Accuracy Evaluation	92
7.6	Results	93
7.6.1	Accuracy	93
7.6.2	3D Marker Reconstruction	93
7.6.3	Deformation Analysis	94
7.7	Discussion	97

<i>CONTENTS</i>	iii
7.7.1 Accuracy	97
7.7.2 The Porcine Vocal Fold as Animal Model	98
7.7.3 Tissue Deformation Characteristics	98
7.7.4 Outlook	100
8 Summary and Outlook	103
Abbreviations & Notations	111
Bibliography	113
List of Figures	123
List of Tables	125
Curriculum Vitae	127

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Anatomie des menschlichen Kehlkopfes	5
2.2	Struktur des Stimmlippengewebes	9
2.3	Phonation	11
2.4	Stimmstörungen	13
2.5	Totale Laryngektomie	13
2.5.1	Kehlkopfkrebs	13
2.5.2	Chirurgischer Eingriff	14
2.6	Erzeugung der Ersatzstimme	15
3	Erfassung der PE-Dynamik	19
3.1	Digitale Hochgeschwindigkeitsendoskopie	20
3.2	Extraktion der PE-Dynamik	22
3.3	Nicht-stationäres Phonationsparadigma	24
3.4	Biomechanische Modellierung	24
4	Modellierung nicht-stationärer PE-Schwingungen	27
4.1	Zeitabhängiges Mehr-Massen-Modell: PEM(t)	28
4.2	Beschreibung der auftretenden Kräfte	30
4.2.1	Ankerkraft	31
4.2.2	Vertikale Kopplungskraft	32
4.2.3	Horizontale Kopplungskraft	33
4.2.4	Kollisionskraft	34
4.2.5	Antriebskraft	35
4.3	Simulation zeitabhängiger PE-Schwingungen	36
4.3.1	Zeitabhängige Skalierung	37
4.3.2	Modellkonfiguration	38
4.3.3	Erzeugung symmetrischer, zeitabhängiger PE-Dynamiken	38

5	Parameteroptimierungsprozedur	41
5.1	Automatische Parameteroptimierung	41
5.1.1	Blockweise Optimierung	42
5.1.2	Anpassung der Modellkonfiguration	42
5.1.3	Zeitabhängige Ruhepositionen	43
5.1.4	Zielfunktion	43
5.1.5	Initialisierung der Optimierungsparameter	47
5.1.6	Ablauf der Optimierung	47
5.2	Validierung mit synthetischen Datensätzen	51
5.2.1	Methodik	51
5.2.2	Ergebnisse	52
5.2.3	Vergleich mit anderen Studien	55
5.3	Anwendung auf reale PE-Schwingungen	55
5.3.1	Anpassungsergebnisse	57
5.3.2	Objective Quantifizierung und Interpretation	63
6	PE-Schwingungen und Qualität der Ersatzstimme	67
6.1	Klinische Daten	67
6.2	Zeitabhängige Modellierung der PE-Schwingungen	68
6.3	Bewertung der Ersatzstimme	69
6.4	Modellbasierter Bewertungsansatz	71
6.5	Erste Anwendung auf klinische Daten	73
7	Vermessung von Stimmlippendeformationen	81
7.1	Grundlagen: 3D Rekonstruktion	82
7.1.1	Das Lochkameramodell	82
7.1.2	Verzeichnung	86
7.1.3	Kamerakalibrierung	86
7.1.4	Stereo-Triangulation	86
7.2	Aufbau für statische Zugversuche	88
7.3	3D Markerrekonstruktion	91
7.4	Untersuchung 3D Deformationseigenschaften	91
7.5	Genauigkeitsuntersuchung	92
7.6	Ergebnisse	93
7.6.1	Genauigkeit	93
7.6.2	3D Markerrekonstruktion	93
7.6.3	Deformationsanalyse	94
7.7	Diskussion	97

7.7.1 Genauigkeit	97
7.7.2 Die Schweinestimmrippe als Tiermodell	98
7.7.3 Gewebedeformationsverhalten	98
7.7.4 Ausblick	100
8 Zusammenfassung und Ausblick	103
Abkürzungen und Bezeichnungen	111
Literaturverzeichnis	113
Abbildungsverzeichnis	123
Tabellenverzeichnis	125
Lebenslauf	127