

Kommunikationsstörungen

Berichte aus Phoniatrie und Pädaudiologie

Herausgeber: M. Döllinger

Begründet 1996 von U. Eysholdt

Veronika Birk

**Automated experimental setup
for phonation investigation in
ex vivo larynges**

Automatisierter, experimenteller
Versuchsaufbau zur Untersuchung
der Phonation exzidierter Kehlköpfe

**SHAKER
VERLAG**

Automated experimental setup for phonation investigation in *ex vivo* larynges

**Automatisierter, experimenteller Versuchsaufbau
zur Untersuchung der Phonation exzidiierter Kehlköpfe**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Veronika Birk
aus Lindau

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 11.01.2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger
Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker

Kommunikationsstörungen - Berichte aus Phoniatrie und
Pädaudiologie

Band 25

Veronika Birk

**Automated experimental setup for
phonation investigation in *ex vivo* larynges**

Automatisierter, experimenteller Versuchsaufbau zur
Untersuchung der Phonation exzidierter Kehlköpfe

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-5887-1

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

Summary

Voice is a fundamental instrument of human communication. Impairment of voice does not only have a negative effect on the quality of the personal life but can even be an existential threat. Voice disorders like chronic hoarseness can lead to a reduction in work efficiency or even to an inability to work. Especially in the in the service sector, which is constantly growing, voice plays an essential role for the economy. Therefore, an effective diagnosis and treatment of voice disorders is indispensable. The basis for this is a proper understanding of the underlying mechanisms of voice production.

Voice results from the interaction of a constant airstream, generated by the lungs, and the soft tissues of the vocal folds, located in the larynx. The resulting oscillation of the vocal folds generates the primary sound signal that is modulated in the vocal tract. Disturbances of this interaction, the so-called phonation, lead to a reduced acoustic quality and therefore to disordered voice.

Besides *in vivo* studies, model based experiments have been established in voice research to investigate the relation between the vocal fold oscillation pattern and the resulting acoustic signal. These models offer the possibility of direct variation and measurement of essential parameters of phonation. Experiments based on *ex vivo* models have the drawback of a restricted experimental duration due to the degeneration of the tissue after dissection. So far, the experimental procedure is based on manual variation of the cartilage posture to vary the pattern of the vocal fold oscillation. Phonation is initiated by manual increase of the laryngeal flow and subjective detection of the phonation onset, which is the beginning of the vocal fold oscillation. These manual procedures are very time consuming and therefore limit the experimental execution.

To improve the manual experimental execution a customized setup, its design, functionality and validation, is presented in this work. The setup consists of electro-mechanical modules for a feedback controlled manipulation of the cartilage posture and the laryngeal flow. Diverse automated measurement functions are implemented in diverse control structures that offer a standardized measurement procedure in a short amount of time as

well as an automated onset detection in real-time. The functionality of the setup is validated with porcine cadaver larynges. Diverse pre-phonatory glottal configurations are adjusted to the larynges and sustained phonation is evoked by a constant airstream. The principal aerodynamic behavior can be reliably reproduced by use of the automated setup.

Furthermore, the experimental setup is applied in a study with nine porcine cadaver larynges simulating different types of glottal closure. The influence of various subjectively categorized closure types on the phonation process (vocal fold oscillation pattern, aerodynamic properties, and acoustic output) is statistically analyzed. Results show that a complete closure of the vocal folds is most beneficial for the phonation process, indicated by an improved oscillatory behavior of the vocal folds and acoustic quality. The oscillatory behavior is quantified by objective parameters. The absolute values of these parameters show relatively small variations compared to their value range. These small variations are difficult to assess. Therefore, the applicability of these parameters in the clinical voice assessment is questionable. However, statistical analysis yield a significant influence on the acoustic quality.

A further study within this work is executed with human cadaver larynges. The influence of the ventricular folds on the phonation process and therewith on the acoustic quality is quantified. Acoustic data, derived from sustained phonation of the larynx with ventricular folds and without these structures, is evaluated to directly compare the derived acoustic parameters. Results indicate that the ventricular folds stabilize the phonation process when these structures do not move. By increasing laryngeal flow the ventricular folds are evoked to a periodic oscillation. This additional motion of the ventricular folds has a negative influence on the quality of voice.

The quantification of the quality of the acoustic signal in this work is based on the Cepstral Peak Prominence (*CPP*). This parameter has been designed for an objective voice assessment and has proven to be more reliable than commonly used time-based parameters like Jitter and Shimmer. In literature there is no standard procedure for the calculation of *CPP*. This makes a quantitative comparison of earlier study results impossible. On grounds of this deficit, three different calculation equations are implemented and the influence on the absolute *CPP* values is investigated using exemplary acoustic data derived from *ex vivo* experiments. Depending on the calculation method, the resulting *CPP* values differ by six orders of magnitude, corresponding to the square of the applied window size used for signal partitioning. In addition, the influence of

the absolute window size and two different methods of averaging over the windows are investigated. Variation in these parameters results in non-linear deviations in absolute *CPP* values. The study demonstrates that a standardized calculation method of *CPP* is desirable enabling a transparent investigation using this parameter.

Zusammenfassung

Die Stimme ist ein fundamentales Mittel der menschlichen Kommunikation. Stimmstörungen haben nicht nur negativen Einfluss auf die Lebensqualität, sondern können auch eine existentielle Bedrohung darstellen. Gerade in Sprechberufen führen Stimmstörungen, wie chronische Heiserkeit, zu einer Minderung der Arbeitsleistung oder sogar zum Arbeitsausfall. Da immer mehr Arbeitnehmer in Bereichen angestellt sind, in denen eine Sprachanwendung erforderlich ist, meist im Dienstleistungssektor, hat dies einen beträchtlichen Einfluss auf die Wirtschaft. Deswegen ist eine effektive Diagnose sowie Behandlung von Stimmstörungen unabdingbar. Die Basis dafür ist ein grundlegendes Verständnis der Stimmerzeugung und der ihr zugrunde liegenden Mechanismen.

Das Stimmsignal resultiert aus der Interaktion eines konstanten Luftstroms aus der Lunge mit den im Kehlkopf befindlichen Stimmlippen. Die erzeugte Oszillation der Stimmlippen erzeugt das akustische Primärsignal, welches im Vokaltrakt moduliert wird. Eine Störung der beschriebenen Interaktion, der sogenannten Phonation, führt zu einer Beeinträchtigung des Stimmsignals, was als Stimmstörung bezeichnet wird.

Für eine systematische Untersuchung des Phonationsprozesses haben sich neben *in vivo* Studien auch modellbasierte Experimente etabliert. Diese Modelle bieten die Möglichkeit einer direkten Manipulation und Messung von essentiellen Phonationsparametern, wie Stimmlippenspannung oder Luftstrom. Exzidierte Kehlkopfmodelle bieten den Vorteil einer realistischen anatomischen Struktur gegenüber synthetischen oder numerischen Modellen. Jedoch begrenzt das Degenerieren des Kehlkopfgewebes die Versuchsdauer erheblich. Die Versuchsdurchführung basiert bisweilen auf manuellen, zeitaufwändigen Methoden. Die Manipulation der laryngealen Knorpelstellung, welche zur Variation der Stimmlippenkonfiguration dient, wird durch mechanische Geräte bewerkstelligt. Eine stabile Phonation wird durch ein manuelles Erhöhen des Luftstroms erreicht, wobei der Beginn der Stimmlippenoszillation (Onset) durch eine subjektive Einschätzung des akustischen Signals detektiert wird. Die manuellen Verfahren zur Parameterveränderung sind sehr zeitintensiv und schränken somit die Versuchsdurchführung erheblich ein.

Um diese manuellen Methoden zu optimieren, wird ein eigens konzipierter experimenteller Aufbau vorgestellt, welcher aus diversen elektro-mechanischen Aufbauten besteht. Diese ermöglichen eine kontrollierte Manipulation der Knorpelstellung und des Luftstroms mit Hilfe einer zentralen Regelung des Aufbaus. Verschiedene integrierte Messfunktionen ermöglichen eine schnelle, standardisierte Versuchsdurchführung sowie eine automatisierte Detektion des Onsets in Echtzeit. Die Funktionalität wird mit Hilfe exzidiert Schweinekehlköpfe validiert. Verschiedene präphonatorische glottale Konfigurationen werden mit Hilfe des Aufbaus eingestellt und eine Phonation mit einem konstanten Luftstrom erzeugt. Die prinzipiellen aerodynamischen Eigenschaften von Schweinekehlköpfen können mit dem vorgestellten automatisierten Versuchsaufbau zuverlässig nachgebildet werden.

Der Versuchsaufbau findet in einer Studie mit neun Schweinekehlköpfen Anwendung, in welcher verschiedene Glottisschlusszenarien simuliert werden. Der Einfluss der subjektiv eingeteilten Glottisschlussstypen auf den Phonationsprozess (Stimmlippenschwingungsmuster, aerodynamische und akustische Eigenschaften) wird statistisch analysiert. Die Resultate zeigen, dass ein kompletter Glottisschluss vorteilhaft für eine gesunde Phonation ist, welche sich in einer regulären Stimmlippenschwingung und einer erhöhten akustischen Qualität äußert. Objektive Parameter der Stimmlippenschwingung zeigen lediglich kleine Schwankungen ihrer Absolutwerte in Relation zu ihrem maximalen Wertebereich. Folglich ist ihre Anwendung im klinischen Umfeld fraglich. Dennoch zeigt die statistische Analyse eine signifikante Korrelation zwischen den Absolutwerten der Oszillationsparameter und der Qualität des akustischen Signals.

Des Weiteren wird eine Studie mit humanen Kehlköpfen präsentiert, welche den Einfluss der Taschenfalten auf die Qualität des akustischen Signals demonstriert. Die Kehlköpfe werden mit und ohne Taschenfalten zur Phonation angeregt und die resultierenden akustischen Signale miteinander verglichen. Somit ist es möglich den direkten Einfluss der Taschenfalten zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen eine stabilisierende Wirkung der Taschenfalten, wenn diese sich während der Phonation nicht bewegen. Bei erhöhtem Luftstrom werden diese jedoch zu einer periodischen Schwingung angeregt. Die Oszillation der Taschenfalten resultiert in einer Minderung der Qualität des akustischen Signals.

Die Auswertung des akustischen Signals der zwei beschriebenen Studien basiert auf dem Cepstral Peak Prominence (*CPP*). Dieser Parameter wurde für die objektive Beurteilung von Stimmaufnahmen entwickelt. Studien zeigen eine zuverlässigere Bewertung des

Stimmsignals im Vergleich zu weit verbreiteten, zeitbasierten Parametern, wie Jitter und Shimmer. Jedoch existiert keine einheitliche Berechnungsmethode des *CPP* in der Literatur, was einen quantitativen Vergleich der Studien unmöglich macht. Diesbezüglich werden drei unterschiedliche Gleichungen zur Berechnung auf ihre Auswirkung auf den absoluten *CPP* Wert hin untersucht. Als Grundlage dienen exemplarische Akustiksignale von exzidierten Kehlkopfversuchen. Abhängig von der jeweiligen Berechnungsmethode weichen die resultierenden *CPP* Werte um den Faktor 6 voneinander ab. Dies entspricht der Fenstergröße im Quadrat, welche für die Einteilung des Signals verwendet wird. Des Weiteren wird der Einfluss der Fenstergröße und unterschiedlicher Mittelungsmethoden untersucht. Eine Variation dieser Parameter verursacht nichtlineare Veränderungen der *CPP* Werte. Die Studie demonstriert, dass eine einheitliche Berechnungsmethode für den *CPP* notwendig ist, um eine transparente Anwendung des *CPP* zu gewährleisten.

Contents

1	Introduction	1
2	Laryngeal anatomy, physiology, and experimental modeling	5
2.1	Anatomy of the larynx	5
2.1.1	Cartilages, joints, and muscles of the larynx	6
2.1.2	Morphology of vocal and ventricular folds	7
2.2	Physiology of phonation	9
2.2.1	Healthy phonation	9
2.2.2	Examination of voice disorders	12
2.3	Current experimental modeling of phonation	15
2.3.1	Porcine larynges as a model	15
2.3.2	Challenges in <i>ex vivo</i> larynx based modeling	17
3	Experimental setup	21
3.1	Overview of experimental setup	21
3.2	Larynx preparation	22
3.3	Thyroid cartilage control	25
3.4	Arytenoid cartilage control	26
3.5	Laryngeal flow control	29
3.6	Data acquisition	35
4	Validation of experimental setup	37
4.1	Vocal fold elongation	37
4.2	Vocal fold adduction	39
4.3	Pressure steps	41
4.4	Flow ramp	44
4.5	Discussion	46

5	Influence of glottal closure on phonation	49
5.1	Importance of glottal closure in phonation	49
5.2	Experimental setup and measurement procedure	50
5.3	Data analysis	51
5.3.1	Partitioning of parameters	53
5.3.2	Statistical analysis	55
5.4	Results	56
5.4.1	Aerodynamic parameters	56
5.4.2	Influence of glottal closure on phonation characteristics	56
5.4.3	Influence of glottal and aerodynamic parameters on acoustic quality	59
5.5	Discussion	60
5.5.1	Parameter values of phonation	60
5.5.2	Influence of glottal closure on phonation characteristics	63
5.5.3	Influence of glottal and aerodynamic parameters on acoustic quality	65
5.6	Conclusion	67
6	Influence of ventricular folds on phonation	69
6.1	Current investigations	69
6.2	Experimental setup and measurement procedure	70
6.3	Results and discussion	72
6.3.1	Flow-induced structural motion	73
6.3.2	Aerodynamic and frequency evaluation	73
6.3.3	Acoustic evaluation by Cepstral Peak Prominence	74
6.4	Conclusion	78
7	Summary and outlook	79
	Bibliography	85
	List of Figures	99
	List of Tables	105

A	Evaluation of Cepstral Peak Prominence as a parameter for voice evaluation	107
A.1	Advantages and challenges of the Cepstral Peak Prominence	107
A.2	Methods	108
A.3	Results and discussion	112
A.4	Summary and conclusion	118
B	Glottal parameter definitions	121