

Kommunikationsstörungen

Berichte aus Phoniatrie und Pädaudiologie

Herausgeber : M. Döllinger

Begründet 1996 von U. Eysholdt

Sebastian Falk

**Numerical analysis of
aerodynamics and aeroacoustics
in normal and disturbed
phonation**

**SHAKER
VERLAG**

Numerical analysis of
aerodynamics and aeroacoustics
in normal and disturbed phonation

Numerische Analyse der
Aerodynamik und Aeroakustik
bei normaler und gestörter Phonation

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

zur
Erlangung des Doktorgrades
DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Sebastian Falk
aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Mai 2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger
Prof. Dr.-Ing. Harald Köstler

Kommunikationsstörungen - Berichte aus Phoniatrie und
Pädaudiologie

Band 30

Sebastian Falk

**Numerical analysis of aerodynamics and
aeroacoustics in normal and disturbed phonation**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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 978-3-8440-8659-1

ISSN 1436-1175

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

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

Danksagung

Moderne Wissenschaft ist immer auch Teamarbeit, deshalb bin ich froh und stolz Teil einer so tollen Arbeitsgruppe gewesen zu sein. Die Verbindung von Wissenschaft und Klinik in den verschiedenen Disziplinen habe ich als sehr bereichernd empfunden.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater und Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger bedanken. Für seine Unterstützung meiner wissenschaftlichen Laufbahn durch stetige Forderung und Förderung bin ich ihm sehr dankbar.

Des Weiteren möchte ich mich bei Frau Dr.-Ing. Marion Semmler und Herr PD Dr.-Ing. Dr. habil. med. Stefan Kniesburges bedanken, die mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind, mit denen ich mich jederzeit fachlich wie auch privat austauschen konnte und mit denen mich mehr verbindet als nur eine großartige Konferenzreise nach Montreal.

Die Arbeit entstand im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DO 1247/10-1) und dem Wissenschaftsfond (FWF, no. I 3702) finanziell geförderten Projektes.

Deshalb möchte ich mich ganz herzlich bei den Kollegen von der TU Graz Herr Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher und Herr Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Schoder für die tolle Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes und darüber hinaus bedanken. Vor allem durch den fachlichen Austausch mit Herr Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Schoder über die Simulation der Aeroakustik konnte ich sehr viel lernen.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei meinen Kollegen Bernhard Jakubaß, Gregor Peters, Reinhard Veltrup, Tobias Schraut, Bogac Tur, Tomas Arias-Vergara, und ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Hossein Sadeghi, und Dr.-Ing. Patrick Schlegel, für die produktiven Gespräche und die gegenseitige Unterstützung auf fachlicher und emotionaler Ebene. Vielen Dank auch an meine Masteranden Philipp Zschörnig, Theresa Schilpp und Farzad Kiani, für die gute Zusammenarbeit und die zuverlässige Zuarbeit in den verschiedenen Projekten.

Ein herzliches Dankeschön gilt natürlich auch allen meinen nicht namentlich genan-

nten Co-Autoren aus der Forschung: für Diskussionen und Ratschläge, für Korrekturlesen, bei Papern, Anträgen und Vorträgen. Vielen Dank für Eure Hilfe und die gute Zusammenarbeit.

Mein innigster und liebster Dank geht an meine Frau Theresa. Danke dir! Du hast mir in den letzten Jahren Rückhalt, Erdung und Liebe gegeben. Vielen Dank für deine Geduld und Entschuldigung für die oftmals wenige Zeit. Du wirst es erst in ein paar Jahren lesen und verstehen können, aber dir, liebe Margarete, möchte ich danken, dass du mir jeden Tag seit deiner Geburt große Freude bereitest und du es immer erfolgreich schaffst mich vom Ernst des Lebens abzulenken. Ein ganz großes Dankeschön geht auch an meine lieben Eltern. Liebe Mama, lieber Papa, vielen Dank, dass ihr mich auf meinem Weg unterstützt habt und ich immer in euren Herzen sein darf. Ich bin euch sehr dankbar, dass ihr mir und meiner Familie bedingungslos zur Seite steht. Ich hoffe ich kann das in gleicher Weise eines Tages an meine Tochter weitergeben. Ein herzliches Dankeschön geht auch an meinen Bruder Alexander, der mir mit viel Geduld meine Studienarbeiten während des Studium korrigiert hat und von dem ich auf diese Weise viel lernen durfte. Ein Dank geht auch an meine Schwiegereltern Ulrike und Joachim die mich und meine Familie ebenso jederzeit unterstützen. Ihr habt alle einen Anteil daran, dass ich das Ziel der Promotion erreicht habe.

Abstract

For the clinical analysis of underlying mechanisms of voice disorders, an innovative numerical aeroacoustic larynx model, called *simVoice*, that mimics commonly observed functional laryngeal disorders as glottal insufficiency, vibrational left-right asymmetries, and aperiodic vocal fold (VF) oscillations was developed.

The hybrid model is a combination of the Finite Volume (FV) CFD solver Star-CCM+ and the Finite Element (FE) aeroacoustic solver openCFS. *simVoice* models turbulence using Large Eddy Simulations (LES) and the acoustic wave propagation with the perturbed convective wave equation (PCWE). Its geometry corresponds to a simplified larynx containing the VFs and the ventricular folds (VeF). Three supraglottal configurations were used: (1) a rectangular vocal tract (VT) model for the validation of the model against experimental data, (2) a more physiologic VT representing the vowel /a/, and (3) a free-field configuration that is used to mimic *ex vivo* experiments. The oscillations of the VFs are externally driven. In total, 50 configurations with synthetic VF oscillations, different degrees of functional-based disorders, and levels of subglottal pressure were simulated and analyzed. Furthermore, 8 configurations of realistic VF dynamics of three *ex vivo* (porcine larynx cadavers) and five *in vivo* (patients) high-speed recordings were mimicked.

The energy transfer between the glottal airflow and the VFs decreases with increasing glottal insufficiency, possibly reflecting the higher effort during speech in affected patients. All these findings imply a reduction in the stimulation of VF oscillations and, consequently, an impairment of the acoustic signal due to functional voice disorders. This impairment in the quality of the acoustic signal is manifested by a decrease in sound pressure level (SPL), cepstral peak prominence (CPP), and vocal efficiency (VE). Asymmetry and aperiodicity result in a smaller amplitude of vibration during VF oscillation. As a result, the flow resistance increases, but otherwise the energy transfer rate decreases, leading to high effort during phonation and decreased sound quality. These findings correlate with symptoms of functional voice disorders such as breathlessness, hoarseness, and increased effort during phonation. Affected individuals often have a soft and low-pitched voice, as evidenced by decreasing sound pressure levels with increasing glottal insufficiency and increasing disruption of VF oscillation. The acoustic characteristics of the eight simulated individual VF dynamics show quantitatively lower values, but qualitatively a good match of the simulated sound with the measured sound. These results thus show the strength of the model to adequately represent voice disturbances.

simVoice confirmed previous clinical and experimental observations that a high

level of glottal insufficiency worsens the acoustic signal quality more than oscillatory left-right asymmetry. In contrast, an aperiodic VF oscillation clearly worsens the quality of the acoustic signal. All these symptoms in combination will further reduce the quality of the sound signal. VF dynamics from the individual *ex vivo* and *in vivo* high-speed recordings can be adequately and effectively transferred into *simVoice* and subsequently simulated with a sufficient accuracy. In summary, *simVoice* allows for detailed analysis of the origins of disordered voice production and hence fosters the further understanding of laryngeal physiology, including occurring dependencies. A current walltime of 8.6 h / oscillation cycle for the /a/ VT is, with a prospective increase in computing power, auspicious for a future clinical use of *simVoice*.

Zusammenfassung

Für die klinische Analyse der zugrundeliegenden Mechanismen von Stimmstörungen wurde ein innovatives, numerisches aeroakustisches Kehlkopfmodell, genannt *simVoice*, entwickelt, das häufig beobachtete funktionelle Kehlkopfstörungen wie Glottisinsuffizienz, schwingende Links-Rechts-Asymmetrien und aperiodische Stimmlippenschwingungen nachahmt.

Das hybride Modell ist eine Kombination aus dem Finite-Volumen (FV) Software Paket Star-CCM+ und der aeroakustischen Finite-Elemente Software openCFS (FE). *simVoice* modelliert die Turbulenz mit Hilfe von *Large Eddy Simulationen* (LES) und die akustische Wellenausbreitung mit der *Perturbed Convective Wave Equation* (PCWE). Seine Geometrie entspricht einem vereinfachten Kehlkopf, der die Stimmlippen und die falschen Stimmlippen enthält. Es wurden drei supraglottale Konfigurationen verwendet: (1) ein rechteckiger Vokaltrakt, der zur Validierung des Modells anhand experimenteller Daten diente, (2) ein physiologischerer Vokaltrakt, der den Vokal /a/ darstellt, und (3) eine Freifeldkonfiguration, die zur Nachahmung von *Ex vivo*-Experimenten verwendet wird. Die Schwingung der Stimmlippen ist extern aufgeprägt. Insgesamt wurden 50 Konfigurationen mit synthetischen Stimmlippenschwingungen, unterschiedlichen Graden von funktionellen Stimmstörungen und unterschiedlichen subglottalen Drücken simuliert und analysiert. Darüber hinaus wurden 8 Konfigurationen, die eine realistische Stimmlippendynamik von drei *Ex vivo* (Kehlkopfkadaver von Schweinen) und fünf *In vivo* (Patienten) Hochgeschwindigkeitssaufnahmen nachahmen simuliert.

Der Energietransfer zwischen dem glottalen Luftstrom und den Stimmlippen nimmt mit zunehmender glottaler Insuffizienz ab und spiegelt möglicherweise die höhere Anstrengung beim Sprechen der betroffenen Patienten wider. Alle diese Befunde bedeuten eine Verringerung der Stimulation der Stimmlippen-Oszillationen und in der Folge eine Beeinträchtigung des akustischen Signals durch funktionelle Stimmstörungen. Diese Beeinträchtigung der Qualität des Schallsignals äußert sich in einem Rückgang des Schalldruckpegels (SPL), des Cepstral Peak Prominence (CPP) und der Vocal Efficiency (VE). Asymmetrie und Aperiodizität führen zu einer kleineren Schwingungsamplitude während der Stimmlippenschwingung. In der Folge erhöht sich der Strömungswiderstand, aber die Energieübertragungsratesinkt, was zu einer hohen Anstrengung während der Phonation und einer verminderten Klangqualität führt. Diese Befunde korrelieren mit Symptomen funktioneller Stimmstörungen wie Atemnot, Heiserkeit und erhöhter Anstrengung bei der Phonation. Betroffene haben oft eine weiche und tiefe Stimme, was sich in einem abnehmenden Schalldruckpegel mit zunehmender

Glottisinsuffizienz und zunehmender Störung der Stimmlippen-Oszillation zeigt. Die akustischen Merkmale der acht nachgebildeten individuellen Stimmlippen Dynamiken zeigen quantitativ niedrigere Werte, aber qualitativ eine gute Übereinstimmung des simulierten Klangs mit dem gemessenen Klang. Diese Ergebnisse zeigen damit die Stärke des Modells Stimmstörungen adequat abzubilden.

simVoice bestätigte frühere klinische und experimentelle Beobachtungen, dass ein hohes Maß an glottaler Insuffizienz die akustische Signalqualität stärker verschlechtert als eine oszillatorische Links-Rechts-Asymmetrie. Im Gegensatz dazu verschlechtert eine aperiodische Stimmlippenschwingung die Qualität des akustischen Signals deutlich. Alle diese Symptome in Kombination vermindern die Qualität des Schallsignals weiter. Die Stimmlippendynamiken aus den einzelnen *ex vivo*- und *in vivo*-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen kann adäquat und effektiv in *simVoice* übertragen und anschließend mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass *simVoice* eine detaillierte Analyse der Ursachen für eine gestörte Stimmproduktion ermöglicht und damit das weitere Verständnis der Kehlkopfphysiologie, einschließlich der auftretenden Abhängigkeiten, fördert. Eine derzeitige Rechenzeit von 8.6 h / Oszillationszyklus für den /a/ Vokaltrakt ist, bei einer voraussichtlichen Steigerung der Rechenleistung, vielversprechend für einen zukünftigen klinischen Einsatz von *simVoice*.