

Einfluss der Stimmlippenoberfläche und asymmetrischer Elastizitätsmodule auf die Phonation

Gregor Peters¹, Alexander Lodermeier¹, Anne Kutz², Franziska Gröhn², Stefan Becker¹

¹ Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland, E-Mail: gregor.peters@fau.de

² Professur für Molekulare Nanostrukturen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland

Einleitung

Die Erforschung der menschlichen Stimme und ihrer Entstehungsmechanismen ist sehr komplex, da die ihr zugrundeliegende Fluid-Struktur-Akustik Interaktion für Messgeräte schwer zugänglich ist. Zusätzlich gibt es eine große Streuung in der Stimmlippenschwingung bei verschiedenen Menschen, was den Zugang zu grundsätzlichen physikalischen Mechanismen erschwert.

Die Untersuchung der Schwingungscharakteristik synthetischer Stimmlippen in einem künstlichen Modell des Sprechapparates liefert definierte Randbedingungen zur Erforschung spezieller Phänomene im Stimmbildungsprozess.

Im Gegensatz zu *in vivo* Messungen und Versuchen mit exzidierten, tierischen oder humanen Kehlköpfen, bietet das künstliche Modell entscheidende Vorteile. *In vivo* Messungen liefern realistische Randbedingungen, allerdings werden die anatomischen Geometrien aufgrund der verwendeten Gerätschaften gestört und Messungen sind auch wegen individuellen Eigenschaften schlecht reproduzierbar. Versuche mit exzidierten Stimmlippen oder Kehlköpfen sind möglich, jedoch ist das Handling aufgrund der eingeschränkten Haltbarkeit aufwendig, die Verfügbarkeit begrenzt und die Reproduzierbarkeit auch nur bedingt gegeben. Der künstliche Aufbau bietet gleichbleibende Randbedingungen, damit eine gute Reproduzierbarkeit, und die Möglichkeit zielgerichteter Modellierung, um grundlegende Eigenschaften des Stimmbildungsprozesses untersuchen zu können.

Asymmetrien sind Folge von Erkrankungen der Stimmlippen und äußern sich zum Beispiel in Heiserkeit. Untersuchungen zur Asymmetrie künstlicher Stimmlippenmodelle wurden bereits in [1] und [2] durchgeführt. In beiden Untersuchungen wurde ein Anstieg des Onset-Druckes in Verbindung mit Asymmetrie festgestellt. Der Einfluss des Vokaltrakts wurde aber vernachlässigt. Dieser Aspekt wurde in Bezug auf symmetrische Stimmlippen in [3] und [4] untersucht. In [3] wurde eine Absenkung des Onset-Druckes durch Einsatz eines Vokaltrakts festgestellt. In [4] wurde das Strömungsfeld untersucht und Rezirkulationsbereiche sowie eine Ablenkung im Vokaltrakt festgestellt, die ohne nicht vorhanden war. Untersuchungen zu künstlichem Mukus wurden mit exzidierten Stimmlippen in [5] und [6] durchgeführt. In beiden Experimenten wurde eine Verringerung der Schwingungsfrequenz der Stimmlippen mit Anwendung von künstlichem Mukus festgestellt.

Ziel dieser Arbeit ist es, Asymmetrien in der Steifigkeit der Stimmlippen in Bezug auf verschiedene supraglottale Konfigurationen zu untersuchen und den Einfluss der Oberflächenmodifikation mit Fokus auf ein Pendant zu menschlichem Mukus im künstlichen Modell.

Phonation

Die menschlichen Stimmlippen befinden sich im Kehlkopf oberhalb der Luftröhre und unterhalb des Vokaltrakts. Ab einem gewissen Druck, dem Onset-Druck, werden die Stimmlippen durch den von den Lungen erzeugten Luftstrom zum Schwingen angeregt. Die Oszillation mit Kontakt der Stimmlippen liefert den Grundton der menschlichen Stimme, der im Vokaltrakt in Frequenz und Amplitude modifiziert wird. Der Zwischenraum der Stimmlippen wird als Glottis bezeichnet. Die Begriffe subglottal und supraglottal bezeichnen die Regionen vor und nach den Stimmlippen, bezogen auf die Strömungsrichtung des Luftstroms. Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Schwingungsverhalten hat der Mukus, eine viskose Flüssigkeit, die sich auf der Oberfläche der Stimmlippen befindet und diese befeuchtet und schmiert.

Künstliches Modell des Sprechapparates

Der grundsätzliche Aufbau des Larynx-Modells ist in Abbildung 1 zu sehen.

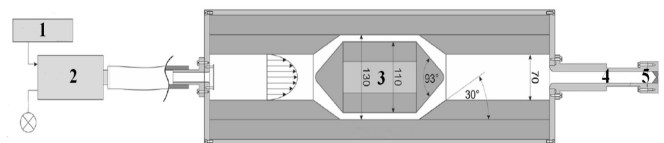


Abbildung 1: Aufbau des Larynx-Modells

Mit der Kombination aus Massenstromgenerator (1) und Ventil (2) wird ein definierter Luftstrom erzeugt, dessen turbulente und akustische Fluktuationen im Silencer (3) ausgeglichen werden. Der Luftstrom gelangt durch den subglottalen Kanal (4) zu den künstlichen Stimmlippen, die paarweise in eine Halterung (5) eingeklebt sind, und regt sie zum Schwingen an. Die Stimmlippen haben einen einschichtigen Aufbau, angelehnt an das Modell M5 von Scherer et. al. [7], und besitzen realistische Abmessungen (siehe Abbildung 2). Die Stimmlippen werden aus einem Gemisch *PartA:PartB:Verdünner* gegossen (EcoFlex 030, Smooth-On, Easton, PA, USA). Der Verdünneranteil ist charakteristisch für ihr Elastizitätsmodul (E) und damit ihre Steifigkeit. Es ergeben sich die in Tabelle 1 gelisteten

Elastizitätsmodule für verschiedenen Verdünneranteil. Das Mischungsverhältnis 1:1:3 (113) wurde als Referenz für symmetrische, gesunde Stimmlippen festgelegt.

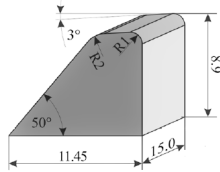


Abbildung 2: Abmessungen der Silikonstimmlippen

Tabelle 1: Elastizitätsmodule der verwendeten Stimmlippen

Stimmlippen	E / kPa
112	8.2
112,5	6.1
113	4.4
113,5	3.2
114	2.5

Supraglottal kann ein Kanal in das Modell integriert werden. Dafür stehen zwei Vokaltrakte unterschiedlicher Geometrie zur Verfügung (siehe Abbildung 3). Der *Standard Vokaltrakt* mit rechteckigem Querschnitt (H:18mm, B:15mm, L:190mm) und der *Story /a/ Vokaltrakt* basierend auf magnetresonanztomographischen Messungen und Ergebnissen von Story [8].

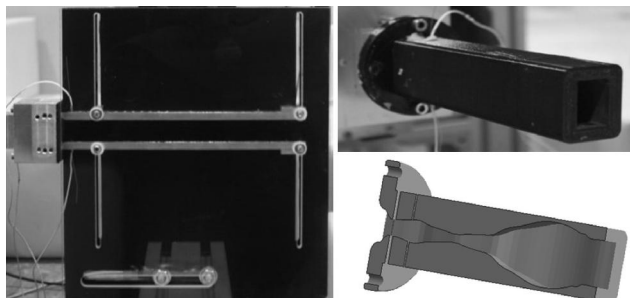


Abbildung 3: *Standard Vokaltrakt* (links) und *Story /a/ Vokaltrakt* (rechts)

Messgrößen

Zur optischen Charakterisierung des Schwingungsverhaltens dienten Highspeed-Kamera-Aufnahmen. Der Wanddruck wurde sub-/supraglottal gemessen, der Schalldruck aufgezeichnet und der eingestellte Massenstrom registriert. On- und Offset der Schwingung konnten damit charakterisiert werden, mittels FFT das Frequenzspektrum sowie das akustische Spektrum der Oszillation und die supraglottalen Drücke lieferten Informationen über die Stabilität und Ablenkung des Luftstroms im Vokaltrakt.

Asymmetrie

Als Referenz zu asymmetrischen Stimmlippenpaarungen dient die symmetrische Paarung 113-113. Ein zugehöriger Oszillationszyklus ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Stimmlippen schwingen gleichmäßig mit Kontakt der Spitzen bei Schluss der Glottis.

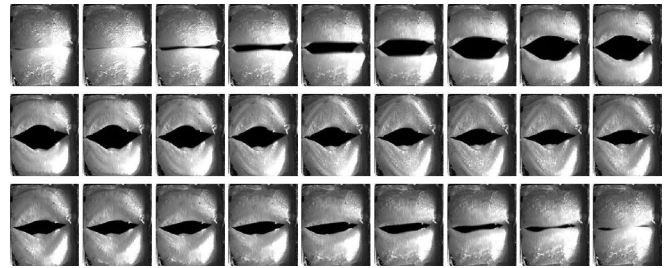


Abbildung 4: Schwingung der symmetrischen Referenz 113-113 mit Vokaltrakt

Die untersuchten Stimmlippenpaarungen sind mit ihrer zugehörigen Differenz im Elastizitätsmodul in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Stimmlippenpaarungen

Stimmlippenpaarung	ΔE / kPa
113-112	3.8
113-112,5	1.7
113-113	0
113,5-113	-1.2
114-113	-1.9

Highspeed-Kamera-Aufnahmen können wegen des eingeschränkten optischen Zugangs des *Story /a/ Vokaltrakts* nur ohne Vokaltrakt und mit *Standard Vokaltrakt* erfolgen. Es wird ein deutlicher Einfluss des Vokaltraktes in Verbindung mit Asymmetrie festgestellt. Als erstes wird die Paarung 113-112 betrachtet. Ohne Vokaltrakt zeigt sich eine Schwingung mit dominanter weicher Stimmlippe und Verstärkung der Schwingung der härteren unter Kontakt der Spitzen miteinander, ähnlich der symmetrischen Konfiguration. Dies deckt sich mit Ergebnissen in [1]. Mit Vokaltrakt (Abbildung 5) dominiert die Schwingung der härteren Stimmlippe (unten), sodass der Zyklus der weicheren (oben) unterbrochen und der Kontakt zwischen Spitze und innerer Oberfläche erfolgt.

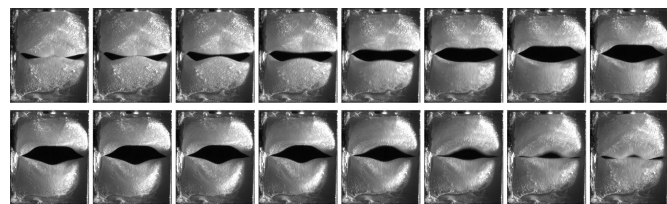


Abbildung 5: Schwingung der asymmetrischen Paarung 113-112 mit Vokaltrakt

Eine Veränderung der Differenz im Elastizitätsmodul führt zu abweichendem Verhalten. Die Paarung 113-112,5 zeigt nur ohne Vokaltrakt einen stabilen Schwingungstyp, der dem der Paarung 113-112 gleicht. Für die Paarung 113,5-113 wird keine stabile Oszillation mit maximalem Massenstrom und ohne Vokaltrakt erreicht. Mit Vokaltrakt wird im Vergleich zum symmetrischen Referenzfall ein deutlich abweichender Schwingungstyp beobachtet (Abbildung 6). Der Kontakt der Stimmlippen miteinander erfolgt auf den inneren Oberflächen. Für die Paarung 114-113 wird nur eine instabile Schwingung mit Vokaltrakt erreicht.

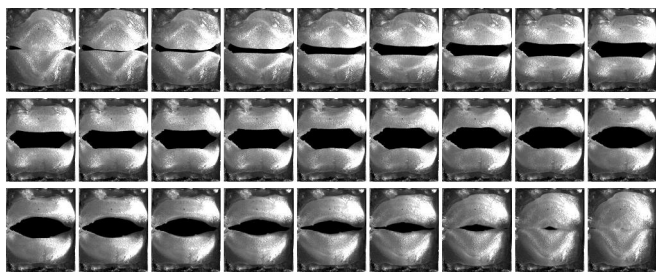


Abbildung 6: Schwingung der asymmetrischen Paarung 113-113,5 mit Vokaltrakt

Um die Auswirkungen der realistischeren Geometrie des *Story /a/ Vokaltraktes* miteinzubeziehen, muss auf die FFT der subglottalen Drücke zurückgegriffen werden. Das Frequenzspektrum der Paarungen mit *Standard Vokaltrakt* ist in Abbildung 7 zu sehen, mit *Story /a/ Vokaltrakt* in Abbildung 8.

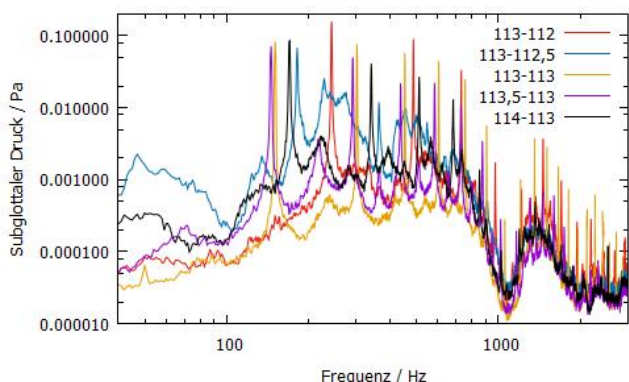


Abbildung 7: FFT des subglottalen Drucks mit *Standard Vokaltrakt*

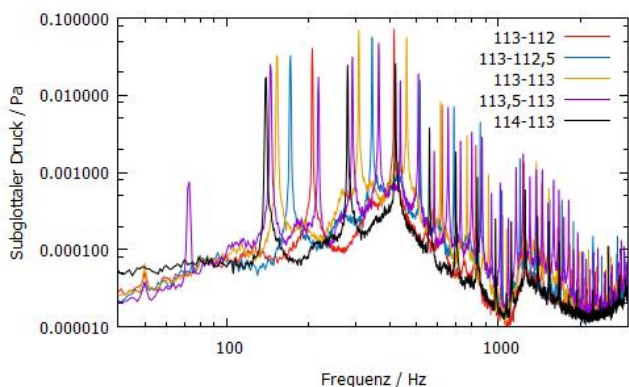


Abbildung 8: FFT des subglottalen Drucks mit *Story /a/ Vokaltrakt*

Mit *Standard Vokaltrakt* fällt ein großer Anteil ausgeprägter Schwingungsfrequenzen bei mehreren Paarungen auf. Das Spektrum der Konfiguration 113-112,5 weist eine besonders breite Verteilung auf und zeugt von einer Instabilität der Schwingung, die mittels Highspeed-Kamera-Aufnahmen bestätigt wird. In der FFT mit *Story /a/ Vokaltrakt* ist dagegen keine Instabilität für diese Paarung erkennbar. Es sind generell gleichmäßigere Spektren aller Paarungen zu vernehmen.

Das akustische Spektrum weist gleiche Eigenschaften auf. Die On-/Offset-Drücke der Stimmlippenpaarungen sind in Abbildung 9 dargestellt. Es ist die Tendenz einer Zunahme der Drücke für einen Anstieg der Differenz im Elastizitätsmodul zu vernehmen. Dies deckt sich für asymmetrische Stimmlippenpaarungen mit härterer

Stimmlipe im Vergleich zur Referenz (113-112, 113-112,5) mit Ergebnissen aus [1] und [2].

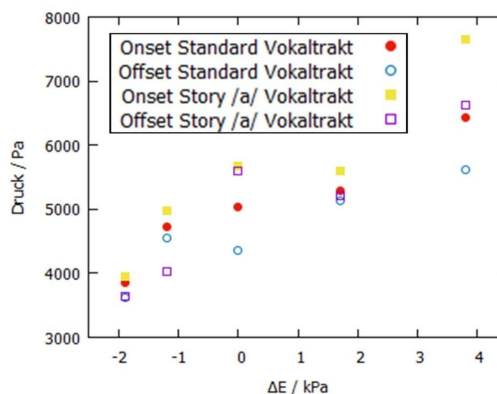


Abbildung 9: Onset/Offset-Drücke

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse für die On-/Offset-Massenströme.

Es zeigt sich keine eindeutige Tendenz einer Zu- oder Abnahme im Massenstrom asymmetrischer Paarungen im Vergleich zur symmetrischen Referenz. Die Massenströme mit *Story /a/ Vokaltrakt* weisen aber für alle Paarungen niedrigere Werte auf als mit *Standard Vokaltrakt*.

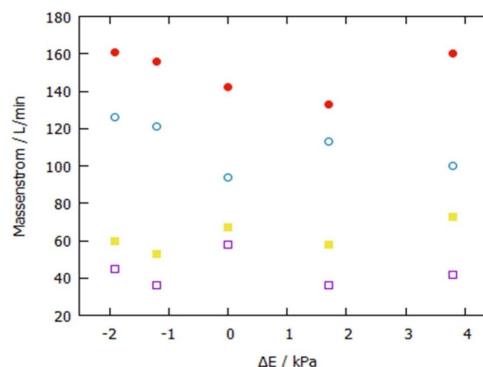


Abbildung 10: Onset/Offset-Massenströme

Ein Vergleich des mittleren supraglottalen Drucks ließ nicht auf eine Ablenkung des Luftstroms in Richtung der härteren oder weicheren Stimmlippe sowie einer Abhängigkeit zur Differenz im Elastizitätsmodul der Stimmlippen schließen.

Mukus

Das unerwünschte Zusammenkleben der Silikonstimmlippen während der Oszillation wird durch Einpudern mit Talkum verhindert. Graphitpulver und Magnesia haben sich in den Untersuchungen ebenfalls als geeignet herausgestellt. Eine beständige, trockene und strapazierfähige Oberfläche hat sich durch Besprühen mit Haarspray von mit Magnesia eingepuderten Stimmlippen ergeben. Magnesia sorgte zudem für eine hydrophile Oberfläche des Silikons und ermöglichte die Anwendung verschiedener Flüssigkeiten auf Wasserbasis. Dabei erwiesen sich Polystyrolsulfonatlösungen verschiedener Polymerkonzentration als besonders geeignet, wie bereits in [6] mit exzidierten Stimmlippen verwendet. Die Lösungen haben eine chemische Struktur, die der von menschlichem Mukus ähnelt. Für diese Versuche wurde ein modifizierter subglottaler Kanal entwickelt, um eine kontinuierliche Zugabe der Flüssigkeit in den Luftstrom zu ermöglichen.

Eine Bestimmung des On-/Offset-Drucks und Massenstroms war dadurch nicht mehr möglich. Es ist eine Fädenbildung bei der Oszillation der Stimmlippen, vergleichbar mit der Fädenbildung bei natürlicher Mukus menschlicher Stimmlippen, vorhanden. Die Fädenbildung ist mit höherer Konzentration an Polystyrolsulfonat von 50g/L (PSS50) (Abbildung 11) ausgeprägter als mit PSS20.

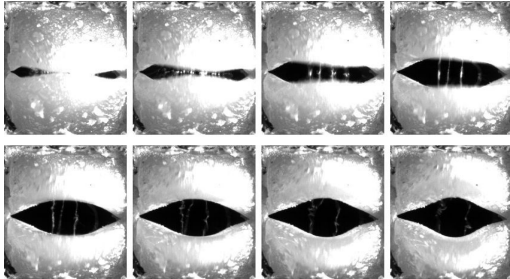


Abbildung 11: Fädenbildung PSS50

Massenströme geringer der mit Talkum gepuderten Stimmlippen werden mit Butter, handelsüblicher Landliebe-Butter und Ghee-Butter, erreicht. Der lipophile Charakter erlaubt ein Aufstreichen der Butter auf unbehandelte Silikonstimmlippen.

In Abbildung 12 ist die FFT des subglottalen Drucks für Stimmlippen mit beiden Buttersorten sowie PSS20 und PSS50 gezeigt, im Vergleich zu Stimmlippen eingepudert mit Talkum. Auffällig sind ausgeprägte Peaks von PSS50 und Landliebe-Butter zwischen den Vielfachen der Grundschwingungsfrequenz, den Harmonischen. Diese Peaks von PSS20 sind weniger auffällig und entsprechen den der mit Talkum präparierten Stimmlippen. Mit Ghee Butter sind sie nicht vorhanden.

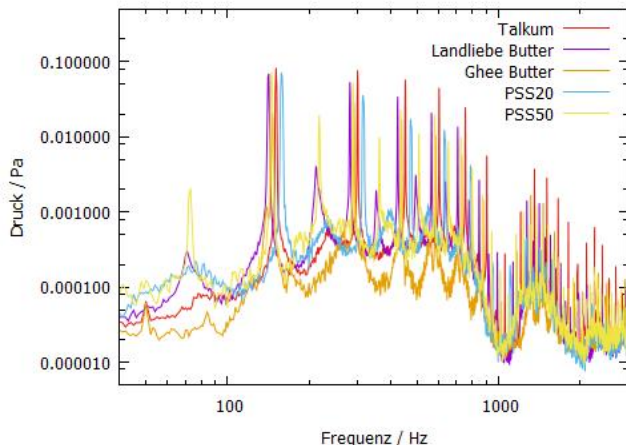


Abbildung 12: FFT des subglottalen Drucks mit Standard Vokaltrakt

Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche zur Asymmetrie zeigen, dass mit der realistischen Geometrie des *Story /a/ Vokaltrakts* Unregelmäßigkeiten der Schwingungscharakteristik aufgefangen werden können, die sich mit der einfachen Geometrie des *Standard Vokaltraktes* im künstlichen Modell des Sprechapparates ergeben haben. Je nach Differenz im Elastizitätsmodul der gepaarten Stimmlippen, haben sich mit letzterem unterschiedliche stabile und instabile

Schwingungsmuster ergeben. Ein optischer Zugang zur Charakterisierung des Schwingungsverhaltens mit *Story /a/ Vokaltrakt* sowie zur Aufklärung des Strömungsprofils mittels PIV-Messungen wäre sinnvoll. In dieser Hinsicht kann auch gefolgert werden, dass der humane Vokaltrakt die Fähigkeit besitzt, Stimmlippen-Asymmetrien in einem gewissen Maß zu tolerieren. Ein weiterer Vorteil des *Story /a/ Vokaltrakts* im künstlichen Modell des Sprechapparates ist die Annäherung des benötigten Massenstroms an geringere, realistischere Werte.

Der benötigte Onset-Druck der Stimmlippen zeigt die Tendenz einer Erhöhung mit Differenz im Elastizitätsmodul der Stimmlippen, das heißt, je weicher die beiden gepaarten Stimmlippen sind. Eine Ablenkung des Luftstroms im Vokaltrakt konnte nicht in Beziehung zur Asymmetrie gesetzt werden.

Butter und Polystyrolsulfonatlösungen der Konzentrationen 50g/L und 20g/L haben sich als anwendbar auf den Silikonstimmlippen erwiesen und gute Ergebnisse geliefert. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, unter anderem, um den Einfluss der Konzentration an PSS zu klären.

Literaturverzeichnis

- [1] B.A. Pickup and S.L. Thomson. Influence of asymmetric stiffness on the structural and aerodynamic response of synthetic vocal folds models. *Journal of biomechanics*, 42(14):2219-2225, oct 2009.
- [2] Zhaoyan Zhang. Vibration in a self-oscillating vocal fold model with left-right asymmetry in body-layer stiffness, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5):EL279, 2010
- [3] Roger W. Chan, Ingo R. Tietze. Dependence of phonation threshold pressure on vocal tract acoustics and vocal fold tissue mechanics. *The journal of the Acoustical Society of America*, 119(4):2351, 2006
- [4] Alexander Lodermeier, Stefan Becker, Michael Döllinger, Stefan Kniesburges, Phase-locked flow field analysis in a synthetic human larynx model. *Exp Fluids*, 56(4), 2015
- [5] Stéphane Ayache. Experiment Study of the Effects of Surface Mucus Viscosity on the Glottic Cycle. *Journal of Voice*, Vol. 18, No. 1, pp.107-115, 2003
- [6] Michael Döllinger, Franziska Gröhn, David A. Berry, Ulrich Eysholdt, Georg Luegmair. Preliminary Results on the Influence of Engineered Artificial Mucus Layer on Phonation. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 57(2):S637, 2014
- [7] R.C. Scherer, D. Shinwari, K. J. D. Witt, C. Zhang, B. R. Kucinski, A. A. Afjeh. Intraglottal pressure profiles for a symmetric and oblique glottis with a divergence angle of 10 degrees, *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Acoustical Society of America* 109, 1616-1630, 2001
- [8] B.H. Story. Comparison of Magnetic Resonance Imaging-based vocal tract area functions obtained from the same speaker in 1994 and 2004, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008