

Strömung-Struktur-Interaktion in der menschlichen Stimmbildung und korrekte Modellierung der resultierenden aeroakustischen Quellen und Schallausbreitung

Stefan Zörner¹, Petr Šidlof², Andreas Hüppe¹, Manfred Kaltenbacher¹

¹ Institut für Mechanik und Mechatronik, 1060 Wien, Österreich, Email: stefan.zoerner@tuwien.ac.at

² Institut für Thermomechanik 182 00 Prag 8, Tschechische Republik Email: petr.sidlof@tul.cz

³ Technische Universität Liberec, NTI FM, 461 17 Liberec, Tschechische Republik

Einleitung

Die menschliche Stimmbildung ist ein komplexes Zusammenspiel der Strömungsmechanik, Strukturmechanik und Akustik. Sobald die Lungen sich komprimieren strömt Luft durch den Kehlkopf, vorbei an den Stimmlippen, die eine enge Einschnürung in der Luftröhre bilden auch Stimmritze bzw. Glottis genannt. Der Luftstrom führt zu Stimmlippenschwingungen welche wiederum die Strömung verändert. Der sich ergebende pulsierende Luftstrom ist die Hauptquelle des dabei entstehenden Schall – die Phonation.

Eine voll gekoppelt 3D Fluid-Struktur-Simulation ist hinsichtlich des Rechenaufwandes extrem zeitintensiv, da in jedem Zeitschritt mehrere Iterationen notwendig sind, um einen Gleichgewichtszustand zwischen der Strömung und Strukturmechanik zu erreichen. Deshalb präsentieren wir 3D-Berechnungen, in der wir die Stimmlippenschwingungen vorgeben und analysieren den erzeugten akustischen Schall. Dabei wenden wir einen hybrid aeroakustischen Ansatz an. Im ersten Schritt führen wir eine CFD Simulation durch und verwenden dabei *OpenFOAM*. Basierend auf den CFD Ergebnissen werden verschiedene Quellterm-Formulierungen analysiert (zweite Ortsableitung des klassischen Lighthill Tensors, Zeitableitung des Strömungsdruckes, etc.). Als Letztes, berechnen wir das Schallfeld mit unserer hauseigenen Forschungssoftware CFS++, basierend auf der Wellengleichung sowie den Störungsgleichungen (PE – perturbation equations). Erste Ergebnisse wurden bereits in [10] veröffentlicht.

Die wichtigsten Ergebnisse unserer Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden: (1) Die Lighthill-Wellengleichung berechnet einen Wechseldruck bestehend aus inkompressibler Strömung und dem Schalldruck; (2) die PE ermöglicht eine korrekte physikalische Berechnung des Schalldruckes innerhalb des Strömungsfeldes; (3) die neue aeroakustischen Wellengleichung basierend auf dem Störungsansatz zeigt eine gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen basierend auf PE.

Strömungsmechanik

Geometrie

Das Rechenggebiet für die Strömung besteht aus einem kurzen geraden subglottischen Bereich der Länge $T_0 = 2,8$ mm, die Stimmlippen der Länge $T_{VF} = 7.2$ mm,

optionale falsche Stimmlippen (FVFs) und eine supraglottische Region der Länge $T_1 = 40$ mm (siehe Abb. 1). Die Höhe (medial-laterale Richtung) und die Tiefe des Kehlkopf-Kanal beträgt $2 * H_0 = 12.0$ mm.

Die Abmessung der Stimmlippen entsprechen denen von [6], die sogenannte „M5“ Form. Das Modell „M5“ ist relativ einfach im Vergleich zu echten Stimmlippen ([9]). Es wird jedoch weithin verwendet, da es leicht parametrisierbar ist und kann mit vertretbarem Aufwand für Messaufbauten hergestellt werden ([5], [3], [7]). Dies ermöglicht Vergleiche mit Simulationen wie auch ihre Verifikation.

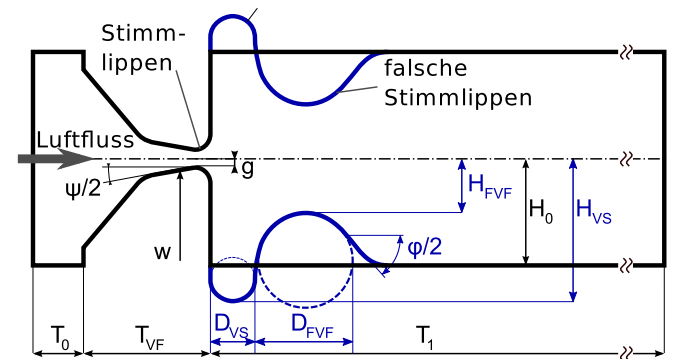


Abbildung 1: Geometrisches Modell des menschlichen Kehlkopfes in coronaler Ebene. Modell ohne (schwarz) und mit (blau) FVFs.

Um die Interaktion zwischen Luft und den Stimmlippen möglichst realistisch zu simulieren, bewegen sich die Stimmlippen fest vorgegeben in lateraler Richtung. Für diesen Fall wurde ein einfacher Sinus als Bewegungsform gewählt, getrieben bei 100 Hz, einer Amplitude von 0.4 mm und einem minimalen Glottisschluss von 0.1 mm.

Mathematisches Modell

Bei normaler Phonation strömt die Luft bei niedrigen Machzahlen ($Ma < 0.2$) und somit kann die Strömung als inkompressibel betrachtet werden. Dies führt zu einer konstanten Fluidichte ρ_f und so gelangt man zu den zeitabhängigen inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen, die unterteilt werden in Massenerhaltungsgleichung und Impulserhaltungsgleichung

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nu \Delta \mathbf{u} + \frac{1}{\rho_0} \nabla p = 0. \quad (2)$$

Hier bezeichnet \mathbf{u} die Strömungsgeschwindigkeit, p den strömungsdynamischen Druck, ρ_0 die Luftdichte und ν die kinematische Viskosität.

Das Modell wird durch Vorgabe eines Strömungsdruckes angetrieben, welches die physiologischen Bedingungen nachahmt. Dabei wird ein konstanter Lungendruck am Einlass und relativer Nulldruck am Auslass ($p = 0$) festgelegt. Die Druckrandbedingung am Einlass betrifft den Gesamtdruck

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) \quad (3)$$

und an den Kanalwänden gilt $\partial p / \partial \mathbf{n} = 0$. In Bezug auf das Geschwindigkeitsfeld werden die Randbedingungen am Eingang auf $\partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{n} = 0$ gesetzt und Haftbedingungen $\mathbf{u} = 0$ für alle nicht beweglichen Wände. Am beweglichen Schnittstellen, den Stimmlippen, wird die Fluidgeschwindigkeit identisch zur vorgeschriebene Bewegungsgeschwindigkeit gesetzt.

Als Strömungslöser wurde das OpenSource Programm *OpenFOAM* verwendet. Für weitere Details und Ergebnisse der Strömungsmechanik wird auf den vorherigen Artikel [10] verwiesen.

Akustik

Geometrie

Das akustische Rechengebiet besteht aus drei Teilgebieten. Der Kehlkopf, indem die aeroakustischen Quellen entstehen. Befestigt am Kehlkopf, ist der zweite Teil, der Vokaltrakt, der 18.25 cm lang ist. Er besteht aus aneinandergereihten Kegelstümpfen welche unterschiedliche Durchmesser besitzen. Der Vokaltrakt wirkt als akustischer Filter und bestimmt den erzeugten Schall durch seine Form. Für die akustischen Simulationen wurde die Vokaltraktgeometrie des Vokals /u/ („Kuh“) gewählt. Die genauen Abmessungen wurden aus der Arbeit von [8] entnommen. Der letzte Teil des akustischen Rechengebietes ist der Ausbreitungsbereich ein $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ großer Kubus der am Ende des Vokaltraktes hinzugefügt wird. Sein Zweck ist es, die Schallwellen in 1 cm Entfernung zu erfassen, mittels eines Mikrofonpunkts „Mic“, welcher außerhalb (flussabwärts) des Mundes plziert wird. In Abb.2 ist das geometrische Modell nochmals zur Verdeutlichung abgebildet, zusammen mit dem Mikrofonpunkt.

Alle Kanalwände werden als hart reflektierend beschrieben und am Einlass und ums Ausbreitungsgebiet wird eine Dämpfungsregion (sogenannte PML – perfectly matched layer) hinzugefügt, um eintreffende Wellen ohne Reflexion zu absorbieren.

Lighthill Analogie

Der Lighthill Ansatz [4] ist eine Umformulierung der kompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen zu einer inhomogenen Wellengleichung

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \Delta p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} T_{ij} \quad (4)$$

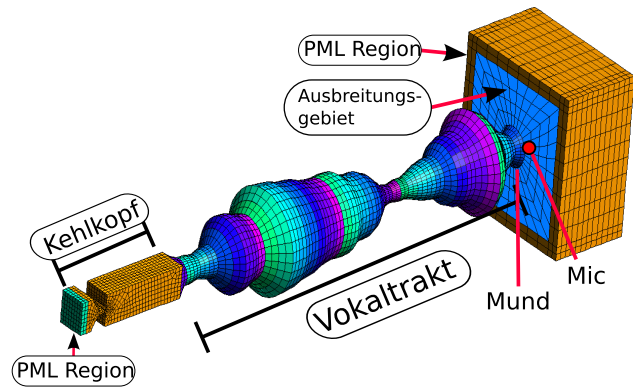


Abbildung 2: Kehlkopf, Vokaltrakt, Ausbreitungsregion, Dämpfungregion (PML)

mit der Schallgeschwindigkeit c , dem Wechseldruck p' und dem Lighthill Tensor \mathbf{T} , der folgendermaßen approximiert wird

$$T_{ij} \approx \rho u_i u_j \quad (5)$$

Lighthills Herleitung geht von einem Szenario aus, bei dem die Region der akustischen Quellen von einem großen ruhendem Fluidvolumen umgeben ist. Befindet sich der Beobachter relativ nahe zur Quelle, muss der berechnete Druck p' als eine Überlagerung von akustischen und hydrodynamischen Druck verstanden werden. Nur für einen Kontrollpunkt weit entfernt von der turbulenten Strömung kann der erhaltene Druck als rein akustisch interpretiert werden.

Störansatz

Im Gegensatz zum Lighthill-Ansatz, berücksichtigen die Störungsgleichungen (PE) mittlere Strömungseffekte. Dieses System partieller Differentialgleichungen kann direkt aus den Gleichungen der Fluidmechanik hergeleitet werden. Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie sowie der Zustandsgleichung. Die grundlegende Idee dabei ist es, die kompressiblen Strömungsgrößen, Druck p^c , Geschwindigkeit \mathbf{u}^c und Dichte ρ^c in mittlere und schwankende Teile aufzuspalten. Für Druck und Geschwindigkeit ergibt dies

$$p^c = \bar{p} + p' \quad \mathbf{u}^c = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (6)$$

Die Wechselanteile nicht als rein akustisch zu verstehen. Deshalb wird die Aufspaltung einen Schritt weiter getrieben um so hydrodynamische Größen (mit \mathbf{v} bezeichnet) formal von akustischen zu trennen. Damit erhalten wir

$$\mathbf{u}^c = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}^v + \mathbf{u}^a. \quad (7)$$

Entsprechend werden die anderen Feldvariablen ebenso aufgespalten. Dies führt zu einem System von partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung des aeroakustischen Feldes in Bezug auf den Schalldruck p^a und Schallschnelle \mathbf{u}^a

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} p^a + \rho c^2 \nabla \cdot \mathbf{u}^a + \nabla \cdot (p^a \bar{\mathbf{u}}) &= - \frac{\partial}{\partial t} p^{\text{ic}} - \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla p^{\text{ic}}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u}^a + (\mathbf{u}^a \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \mathbf{u}^a + \frac{1}{\rho} \nabla p^a &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Tabelle 1: Die Ersten drei Formanten aus der natürlichen Sprache, gemessen von [8] und simuliert durch unseren reproduzierten Vokaltrakt. Natürliche Sprache ist angegeben durch ein hochgestelltes „N“, die simulierte Version durch „S“ (für Lighthill Analogie und PE identisch).

	/u/ ^N	/u/ ^S
F1	389 Hz	270 Hz
F2	987 Hz	1000 Hz
F3	2299 Hz	2484 Hz

Hier wird die rechte Seite der ersten Gleichung in (8) mit Hilfe der CFD-Ergebnisse ermittelt – aus den inkompressiblen Variablen p^{ic} und durch Zeitmittelung bestimmte Strömungsfeld $\bar{\mathbf{u}}$.

Wellengleichung basierend auf Störansatz

Basierend auf die Störungsgleichungen (8) ist es möglich, eine inhomogene Wellengleichung herzuleiten, die als alternative zum Lighthill Ansatz dient. Hierfür werden Effekte der Strömung auf die Ausbreitung der Akustik vernachlässigt. Für diesen Fall ist die mittlere Strömung $\bar{\mathbf{u}} = 0$. Infolgedessen entfallen alle Terme aus (8) die unterstrichen sind und man erhält

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} p^a + \rho c^2 \nabla \cdot \mathbf{u}^a &= -\frac{\partial}{\partial t} p^{ic}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u}^a + \frac{1}{\rho} \nabla p^a &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Wendet man die Zeitableitung $\partial/\partial t$ auf die erste Gleichung von (9) an und den Nablaoperator ∇ auf die Zweite kann durch subtrahieren die Variable \mathbf{u}^a eliminieren und man erhält

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} p^a - c^2 \Delta p^a = -\frac{\partial^2}{\partial t^2} p \quad (10)$$

welche hier als *aeroakustische Wellengleichung* bezeichnet wird. Siehe dazu auch [2] und für zuzüglicher Information der PML referenzieren wir auf [1].

Akustikerggebnisse

Das akustische Spektrum ausgewertet am Mikrophonpunkt „Mic“, positioniert 1 cm hinterm dem Mund, ist in Abb.3 für den Vokal /u/ dargestellt. Dabei wurde einmal die Berechnung nach Lighthills Analogie durchgeführt und einmal mittels der Störungsgleichungen. Die berechneten Formanten (lokale Maxima der spektralen Hüllkurve, unverkennbaren Eigenschaften der einzelnen Vokale) sind in Tab.1 zusammengefasst. Die Simulation ergibt dabei eine gute Übereinstimmung zu den von [8] gemessenen Formanten aus der natürlichen Sprache. Die Diskrepanz ist erklärbar durch das zusätzliche Volumen der CFD Dömane, die eine Abweichung zu dem gemessenen Vokaltrakt bildet.

Ebenfalls gut übereinstimmend sind die Spektren, die aus den zwei Analogien bestimmt wurden. Die Formanten sind für beide identisch. Allerdings ist für die Amplituden der Hauptfrequenz von 100 Hz und dessen Harmonische ein Unterschied von bis zu 30 dB vorzufinden.

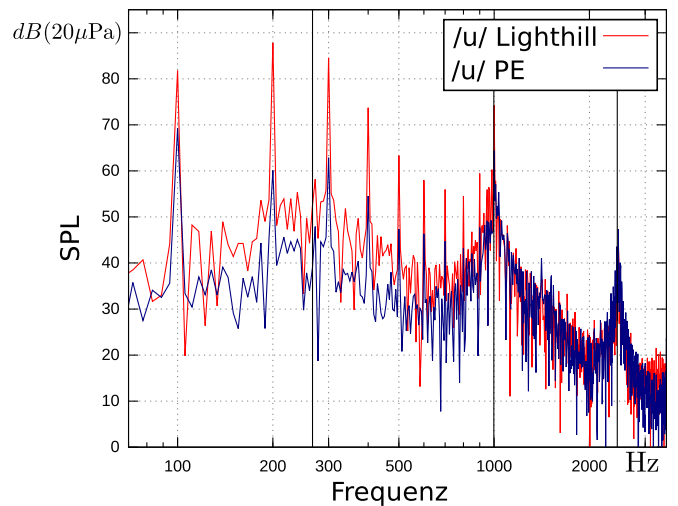


Abbildung 3: Vergleich des Schalldruckes berechnet nach Lighthills Analogie und den Störungsgleichungen (PE). Formanten durch schwarze vertikale Striche hervorgehoben.

In zwei weiteren Simulationen wurden die Störungsgleichungen und die aeroakustische Wellengleichung mit einander verglichen. Dabei wurden die Quellterme aus den Strömungsergebnissen der Simulation mit FVFs, um auch ihren Einfluss auf die Stimmgebung zu analysieren, gewonnen. In Abb 4 sind die akustischen Spektren dieser zwei Simulationen ermittelt am Beobachtungspunkt „Mic“ dargestellt. Entlang des dargestellten Frequenzbereich sind die Amplituden im selben Bereich. Ebenfalls sind die Anzahl der erkennbaren harmonischen Frequenzen identisch. Allerdings ist bei der ersten Hauptfrequenz ein Unterschied von ca. 10 dB zu erkennen.

Vergleicht man die Simulationen mit und ohne FVFs (Abb. 3 und Abb. 4) ist zu erkennen, dass im Falle der Störungsgleichungen die Amplituden der Harmonischen nicht stark abweichen. Allerdings sind nicht harmonische Frequenzen bis zu 10 dB geringer für den Fall mit FVFs. Für die Stimmgebung würde dies eine Reduzierung der Heiserkeit bedeuten.

Zusammenfassung

Der Artikel stellt mehrere hybride Verfahren vor. Die Störungsgleichungen werden dabei als Referenz verwendet, da sie den akustischen Druck physikalisch vom Strömungsdruck trennen. Aus den Ergebnissen zeigt sich eine generelle gute Übereinstimmung zwischen allen Verfahren. Doch es ist zu beachten, dass die Lighthill Analogie den akustischen Druck stark überschätzt, besonders für die Harmonischen (bis zu 30 dB). Hingegen ist der Vergleich der Störungsgleichungen zur aeroakustischen Wellengleichung besser.

Der Vergleich zeigt eine gut Übereinstimmung aller Verfahren und zeigte sich geeignet, um die Lautwidrigabe des Menschen nachzubilden. Ebenso konnten Geometrieänderung innerhalb des Kehlkopfes (FVFs) und deren Auswirkung auf die Akustik präzise analysiert werden. Dies ermöglicht die für den Stimmprozess relevante Mechanismen zu erforschen und die Phonation im Einzelnen

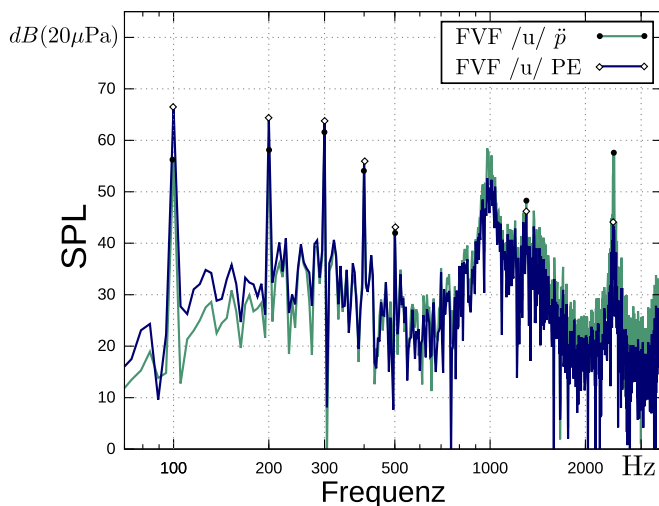


Abbildung 4: Vergleich des Schalldruckes berechnet mittels der Störungsgleichungen (PE) und der druckbas. Wellengleichung.

zu verstehen.

Danksagung

Die Forschung wurde vom österreichischen Wissenschaftsfonds FWF unter Projektnr. I 532-N20 und von der tschechischen „Science Foundation“ unterstützt unter Projektnr. P101/11/0207. Ebenso bedanken wir uns bei den österreichischen und tschechischen Behörden ICM OeAD und MŠMT (Projekt Nr. CZ 09/2013 - 7AMB13AT006), welche die effektive Kooperation zwischen den Autoren ermöglichten. Die CFD-Simulationen wurden auf dem Supercomputing Center der CTU in Prag berechnet.

Literatur

- [1] M. Kaltenbacher. *Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators: Finite Elements for Computational Multiphysics*. Springer Verlag, 2015.
- [2] M. Kaltenbacher and A. Hüppe. Comparison of aeroacoustic source term formulations. In *Proceedings of the DAGA'14*, 2014.
- [3] S. Kniesburges, C. Hesselmann, S. Becker, E. Schlücker, and M. Döllinger. Influence of vortical flow structures on the glottal jet location in the supraglottal region. *Journal of Voice*, 27(5):531–544, 02 2015.
- [4] M. J. Lighthill. On sound generated aerodynamically I. General theory. *Proceedings of the Royal Society of London*, 211:564–587, 1951.
- [5] S. Becker, S. Kniesburges, S. Müller, A. Delgado, G Link, M Kaltenbacher, and M Döllinger. Flow-structure-acoustic interaction in a human voice model. *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, 125:1351–1361, 2009.
- [6] R. C. Scherer, D. Shinwari, K. J. De Witt, C. Zhang, B. R. Kucinski, and A. A. Afjeh. Intraglottal pres-

sure profiles for a symmetric and oblique glottis with a divergence angle of 10 degrees. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(4):1616–1630, 2001.

- [7] R. C. Scherer, D. Shinwari, K. J. De Witt, C. Zhang, B. R. Kucinski, and A. A. Afjeh. Intraglottal pressure distributions for a symmetric and oblique glottis with a uniform duct (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(4):1253–1256, 2002.
- [8] B. H. Story, I. R. Titze, and E. A. Hoffman. Vocal tract area functions from magnetic resonance imaging. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1):537–554, 1996.
- [9] P. Šidlof, J. G. Švec, J. Horáček, J. Veselý, I. Klepáček, and R. Havlík. Geometry of human vocal folds and glottal channel for mathematical and biomechanical modeling of voice production. *Journal of Biomechanics*, 41:985–995, 2008.
- [10] P. Šidlof, S. Zörner, and A. Hüppe. A hybrid approach to the computational aeroacoustics of human voice production. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, pages 1–16, 2014.