

Lokalisation und Charakterisierung aeroakustischer Quellen mittels laserbasierter Strömungsmessungen

Alexander Lodermeier¹, Stefan Becker¹, Eman Bagheri¹, Matthias Tautz¹, Stefan Kniesbruges²

¹ Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: lo@ipat.fau.de

² Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie, Universitätsklinikum Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland

Einleitung

In der experimentellen Aeroakustik ist es oftmals notwendig, Schallquellen zu lokalisieren. Mit der Technologie des Mikronfon-Arrays und des Beamformings existieren bereits vielversprechende Verfahren in der Akustik. Um zusätzlich zur Lokalisation die zugrundeliegenden Mechanismen der aeroakustischen Schallentstehung zu verstehen, ist jedoch eine weiterführende Methodik notwendig.

Besonders in der Stimmforschung ist eine solche Messmethodik von Vorteil, da die der menschlichen Stimme zugrundeliegenden Schallentstehungsmechanismen noch nicht ausreichend verstanden wurden. Die strömungsmechanische Beschreibung des glottalen Jets sowie des weiteren Verlaufs im Vokaltrakt ist Gegenstand aktueller Forschung. Akustische Quellterme konnten so charakterisiert werden.

Titze (1994) beschreibt den transglottalen Massenstrom, welcher durch die Stimmlippenschwingung moduliert wird, als die wichtigste Schallquelle. Die Turbulenz entlang des Massenstroms dagegen bezeichnet er als sekundär und Merkmal für eine heisere Stimme.

Um das hochgradig instationäre Strömungsfeld hinter den Stimmlippen auf ihre Schallentstehungsmechanismen hin zu untersuchen, werden akustische Analogien angewandt. Die bahnbrechende Analogie von Lighthill (1952) findet hier auch heute noch Anwendung, da sie analytisch korrekt von den Navier-Stokes Gleichungen abgeleitet wurde. Mit dieser Analogie kann aus dem Geschwindigkeitsfeld ein akustischer Quellterm berechnet werden. Durch Abschätzung dessen Ausbreitung ins Fernfeld kann auf dessen Beitrag zur Schallentstehung geschlossen werden.

In der Literatur existieren u.a. hybride, numerische Verfahren, die die Berechnung von akustischen Quelltermen und der Schallausbreitung auf Basis einer CFD-Simulation ermöglichen. Probleme in der CFD-Simulation entstehen immer wieder, weil hohe zeitliche und räumliche Auflösungen für die Abbildung der Strömungsmechanik und der Akustik notwendig sind. Dazu kommen lange Rechenzeiten und - im Speziellen für die Stimmforschung - das Kontaktproblem bei Stimmlippenschwingungen.

In unserem Ansatz wird zunächst das Strömungsfeld zeitlich und räumlich hochaufgelöst vermessen. Die daraus ermittelten Geschwindigkeitsfelder werden zur Berechnung von Quelltermen verwendet. Anschließend wird die Schallausbreitung ins Fernfeld anhand der Finiten Ele-

mente Methode (FEM) simuliert.

Experimenteller Aufbau

Unser experimentelles Modell des Vokaltraktes basiert auf dem in der Stimmforschung weit verbreiteten M5-Modell der Stimmlippen. Es weist realistische Abmaße, E-Modul und Schwingungsfrequenzen auf, ist also mit einer in vivo Situation gut vergleichbar. Die Stimmlippen aus Silikon werden an einem subglottalen Kanalrohr befestigt, welches die Tracheen imitiert. Dieses wiederum ist auf einem Dämpfer befestigt, der mit einer Lunge verglichen werden kann und gleichzeitig den Massenstrom für die Stimmlippen konditioniert. Die Stimmlippen weisen bei einem konstanten Massenstrom selbsterhaltende Schwingungen auf mit der für menschliche Stimmlippen typischen Konvergenz-Divergenz-Formänderung. Während eines Schwingungszyklus verschließen sich die beiden Stimmlippen für kurze Zeit und sorgen so für einen modulierten Massenstrom - ein Zeichen einer gesunden Stimme. Die Strömung direkt hinter den Stimmlippen wurde mittels High-speed PIV vermessen. Dabei wurde das Strömungsfeld mit 2 kHz aufgelöst.

Ein schematischer Ausschnitt des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 1 zu finden.

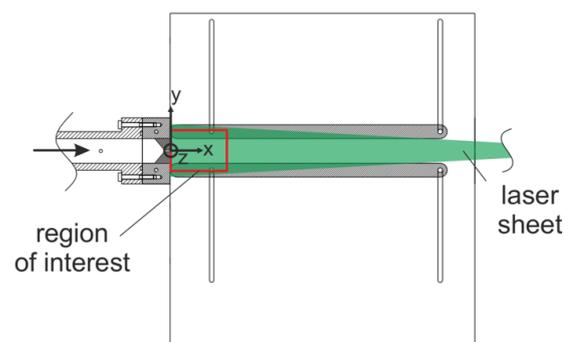


Abbildung 1: subglottaler Kanal, Stimmlippen, supraglottaler Kanal im experimentellen Aufbau. Die durch das Lasermessverfahren vermessene Region of Interest ist farblich rot hervorgehoben.

Numerisches Modell

Die akustischen Quellterme wurden anhand Lighthill's akustischer Analogie berechnet. In für niedrige Mach-Zahlen vereinfachter Form lässt sich die inhomogene Wellengleichung mit dem Quellterm auf der rechten Seite

ausdrücken als

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

mit dem Lighthill'schen Spannungstensor

$$T_{ij} \approx \rho_0 u_i u_j \quad (2)$$

und dem fluktuierenden Schalldruck p' , der Schallgeschwindigkeit c_0 , der Dichte ρ_0 und der Strömungsgeschwindigkeit u_i . Der Quellterm beruht also auf den Geschwindigkeitsfeldern, weshalb die PIV-Messungen direkt für dessen Berechnung verwendet wurden.

Die berechneten Quellterme werden im nächsten Schritt auf ein FEM-Gitter interpoliert. In einer Simulation wird dann die Schallausbreitung in das Fernfeld gerechnet. Dazu wurde der Akustik-Solver von CFS++ (Multi-Physics Solver der TU Wien, siehe Kaltenbacher (2015)) verwendet. Die Ergebnisse können in einem letzten Validierungsschritt mit Schalldruckmessungen verglichen werden. Letztere wurden im hauseigenen, schalltoten Raum durchgeführt. Genauere Angaben zu diesem Vorgehen sind bei Lodermeier et al. (2018) beinhaltet.

Ergebnisse

In Abbildung 2 ist exemplarisches Ergebnis der PIV-Messung dargestellt. Der Betrag der Richtungskomponenten der Strömungsgeschwindigkeit ist als Falschfarbenplot gekennzeichnet und die Vektoren verdeutlichen die Strömungsrichtung. Die Stimmlippen - aufgrund der PIV-Auswertemethodik nicht sichtbar - befinden sich im Koordinatensystem an der Stelle $x = 0$ mm. Deutlich sichtbar ist der glottale Jet, innerhalb dessen hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. Der glottale Jet wird nach oben abgelenkt und formiert sich so zu einem großen Rezirkulationsgebiet. Aus den Geschwin-

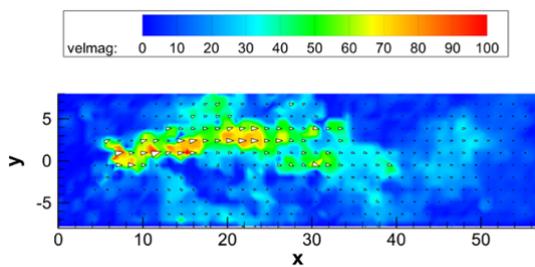


Abbildung 2: Darstellung des Strömungsfeldes. Die Falschfarbendarstellung zeigt den Betrag der Geschwindigkeitskomponenten u und v als Betrag in m/s an. Die Position auf der x -Achse und y -Achse sind in mm angegeben.

digkeitsfeldern wurden die akustischen Quellterme nach Lighthill berechnet. Ein exemplarisches Feld ist in Abbildung 3 dargestellt. Dieses basiert auf dem instantanen Geschwindigkeitsfeld, welches in Abbildung 2 abgebildet ist. Deutlich sind intensive Quellterm-Fluktuationen entlang des glottalen Jets zu sehen. Die stärkste Quelle befindet sich direkt am Auslass der Stimmlippen. In einer

Auswertung in der Frequenzdomäne konnte dieser Quellterm der ersten harmonischen Schwingungsfrequenz der Stimmlippen und in leicht abgeschwächter Form deren Vielfachen zugeordnet werden. Dieser Quellterm ist also für das wichtigste Grundsignal einer gesunden Stimme verantwortlich.

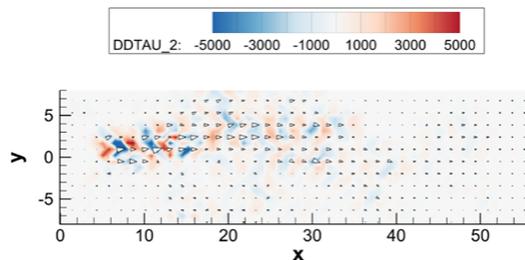


Abbildung 3: Akustische Quelltermintensität, basierend auf Lighthills akustischer Analogie. Die Quelltermintensität wird durch die Falschfarbendarstellung in Pascal pro Quadratmeter dargestellt.

Auf Basis des Quelltermfelds wurde in einer FEM-Simulation die Ausbreitung des akustischen Potentials und damit des Schalldrucks berechnet. Ein instantanes, exemplarisches Feld der Schalldruckfluktuation, ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Schall, der aus dem Kanalrohr nach den Stimmlippen austritt, weist dabei Kugelstrahler-ähnliches Verhalten auf.

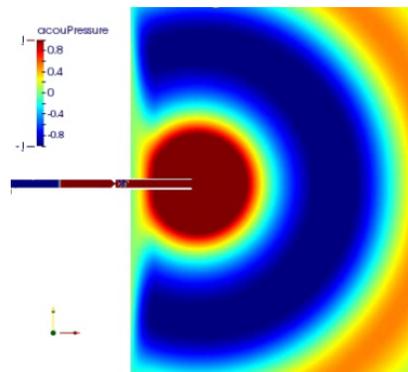


Abbildung 4: Schallabstrahlung vom Quellgebiet nach den Stimmlippen (im kleinen Kanalrohr) in das freie Fernfeld nach dem Kanal. Die Falschfarbendarstellung zeigt die Schalldruckfluktuation in Pascal.

Die Simulation der Schallabstrahlung ins Fernfeld ist nun vergleichbar mit Schalldruckmessungen einzelner Mikrofone in einem schalltoten Raum. Exemplarisch dafür wurde eine Mikrofonposition im Abstand von 0.9 m senkrecht zum Kanalausstritt verwendet. Ein Spektrum der realen Mikrofonmessung an diesem Punkt und eine virtuelle Mikrofonmessung in der Simulation am selben Punkt sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Breitbandschallanteile werden in der Simulation treffend wiedergegeben. Auch die tonalen Komponenten werden bzgl. ihrer Frequenz getroffen. Allerdings lässt sich hier eine Unterschätzung der Amplitude gegenüber der realen Messung feststellen, die für höhere Harmonische nochmals zunimmt. Außerdem werden sog. Subharmonic Peaks, die sich zwischen den

Harmonischen befinden, nicht durch die Simulation abgebildet. Das kann als Hinweis auf deren Ursprung interpretiert werden: da sie nicht durch den aeroakustischen Ansatz erfasst werden, könnte ihr Ursprung nicht auf den strömungsakustischen Quelltermen basieren.

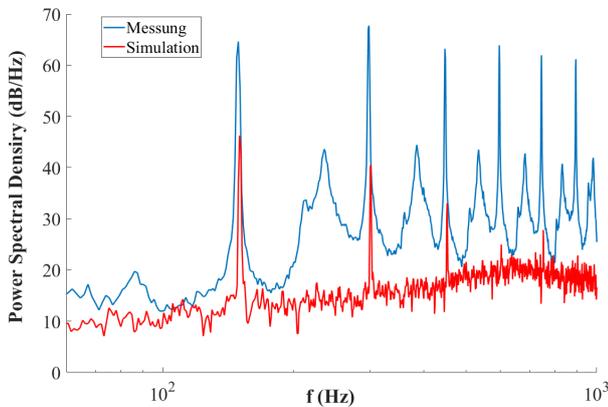


Abbildung 5: subglottaler Kanal, Stimmlippen, supraglottaler Kanal im experimentellen Aufbau. Die durch den Laser vermessene Region of Interest (ROI) ist farblich rot hervorgehoben.

Schlussfolgerungen

Durch unseren Hybriden PIV-Ansatz konnten wir grundsätzliche Schallentstehungsmechanismen für ein Modell der menschlichen Stimme charakterisieren. Dabei wurde der Quellterm für die tonalen Schallanteile am direkten Austritt der Strömung bei den Stimmlippen lokalisiert. Breitbandanteile - die bei Heiserkeit und anderen Stimmerkrankungen verstärkt auftreten - konnten entlang des glottalen Jets nachgewiesen werden.

Auf dieser Methodik können wir in zukünftigen Arbeiten aufbauen und Stimmerkrankungen untersucht werden. Die aeroakustischen Entstehungsmechanismen können genau erfasst werden. So kann nicht nur ein Beitrag zum besseren Verständnis der Stimmentstehung geleistet werden, sondern auch Stimmerkrankungen bzgl. ihrer aeroakustischen Mechanismen genau charakterisiert werden.

Literatur

- [1] Becker S., Kniesburges S., Müller S., Delgado A., Link G. and Kaltenbacher, M.: Flow-structure-acoustic interaction in a human voice model. *J. Acoust. Soc. Am.* 125 (2009)
- [2] Kaltenbacher M.: Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators. Springer-Verlag (2015)
- [3] Lighthill, M.J.: On Sound Generated Aerodynamically I - General Theory. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences* (1952)
- [4] Lodermeier A., Becker S., Döllinger M. and Kniesburges S.: Phase-locked flow field analysis in a synthetic human larynx model. *Exp Fluids* 56 (2015)

- [5] Lodermeier A., Tautz M., Becker S., Döllinger M., Birk V. and Kniesburges S.: Aeroacoustic analysis of the human phonation process based on a hybrid acoustic PIV approach. *Exp Fluids* 59 (2018)
- [6] Sidlof P., Zörner S. and Hüppe A.: A hybrid approach to the computational aeroacoustics of human voice production. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 14 (2015)
- [7] Titze, I.: Principles of voice production. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA (1994)