

Die humane Stimmgebung

als Produkt einer Fluid-Struktur-Akustik Interaktion

Stefan Becker, Michael Döllinger, Manfred Kaltenbacher

Der Stimmgebungsprozess ist ein komplexer physiologischer Vorgang, der primär im Kehlkopf stattfindet. Die Stimmerzeugung bzw. der Stimmklang hängen vom exakten Zusammenspiel zwischen Luftströmung, Bewegungen von Gewebestrukturen und Vokaltraktgeometrien ab. Der Stimmgebungsprozess ist somit ein Paradebeispiel einer biologischen Fluid-Struktur-Akustik Interaktion (FSAI) im Menschen. Aufgrund der räumlichen Enge im Kehlkopf und der Komplexität des Prozesses ist diese FSAI bisher noch relativ wenig verstanden. Der vorliegende Beitrag zeigt aktuelle Simulationsmodelle und experimentelle Methoden auf, die speziell dafür entwickelt wurden, die hier vorliegende FSAI zu analysieren und besser zu verstehen. Die Simulationsmodelle basieren auf der numerischen Lösung der physikalischen Gleichungen, wobei dazu vorrangig Finite-Elemente und Finite-Volumen Methoden zum Einsatz kommen. In den experimentellen Ansätzen erfolgen synthetische Nachbauten vereinfachter und komplexer Kehlkopfmodelle mit und ohne Vokaltraktgeometrie. Der wesentliche Vorteil numerischer Modelle und synthetischer Nachbauten im Gegensatz zu in vivo Untersuchungen ist die bessere Zugänglichkeit der FSAI während des Stimmgebungsprozesses. Ziel der näheren und zukünftigen Untersuchung der FSAI ist das fundierte Verständnis der menschlichen Stimmgebung und somit die Voraussetzung für verbesserte und zielgerichtete Therapieverfahren.

Einführung

In den heutigen Dienstleistungsgesellschaften nimmt die Kommunikation eine immer größere gesellschaftliche und soziale Rolle ein. Die wohl wichtigste Form der Kommunikation basiert auf der Sprache. Physiologische Grundlage der Sprache ist eine funktionierende Stimmgebung. Die für die Stimmgebung wichtigsten Strukturen sind hierbei die zwei sich gegenüberliegenden Stimmlippen, die bei der Stimmgebung (auch Phonation genannt) durch einen von den Lungen kommenden Luftstrom, zum Schwingen angeregt werden. Der erzeugte Grundton korrespondiert mit der Schwingungsfrequenz der Stimmlippen und ist abhängig von Geschlecht und Alter. Kinder erzeugen einen physiologischen Grundton bei ca. 230 Hz – 300 Hz, Frauen bei 190 Hz – 250 Hz und Männer bei 120 Hz – 160 Hz [1]. Bei Singstimmen wurden jedoch auch Stimmlippenschwingungen

Human Phonation as a Fluid-Structure-Acoustic Interaction

Human phonation is a complex interaction of fluid mechanics, solid mechanics and acoustics. As the lungs compress, air flows through the larynx passing the vocal folds which form a narrow constriction, the glottis. The air flow forces the vocal folds to vibrate which in turn generate a pulsating air stream. Based on aeroacoustic principles, the sound is generated by the pulsating air-jet and supraglottal turbulent structures. Thereby, the voice is a prime example for a biological Fluid-Structure-Acoustic Interaction (FSAI). This contribution presents the state of art simulation models and experimental investigations, which have been developed to gain a detailed understanding of this complex FSAI process. The numerical simulation models are based on the physical equations of flow dynamics, structural mechanics and acoustics as well as their interactions and are mainly solved by the Finite Element (FE) and / or Finite Volume (FV) method. The experimental investigations are based on synthetic models, which mimic the phonatory process without and with vocal tract. Thereby, a reasonable accessibility by modern measurement techniques is obtained.

von bis zu 1.568 Hz beobachtet [2]. Der erzeugte Grundton wird dann im supraglottalen Vokaltrakt wie Rachen, Mund- und Nasenhöhle moduliert und vom Gegenüber als Ton wahrgenommen [3]. Die aktuelle Annahme ist, dass bei der Stimmgebung das akustische Schallsignal aus einer Kombination von 3 Quellkomponenten der Fluid-Struktur-Interaktion resultiert, die in ihren prozentualen Anteilen am Gesamtschall je nach Frequenzbereich variieren können. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 1 (siehe folgende Seite) schematisch dargestellt. Durch das periodische Öffnen und Schließen der Glottis kommt es zum volumenstrommodulierten Schallanteil. Der wirbelinduzierte Schallanteil lässt sich aus supraglottalen Luftwirbeln unterschiedlicher Frequenz und räumlicher Ausdehnung erklären. Dabei ist festzuhalten, dass die Frequenz des entstehenden Schalls indirekt proportional zur charakteristischen Wirbelgröße ist,

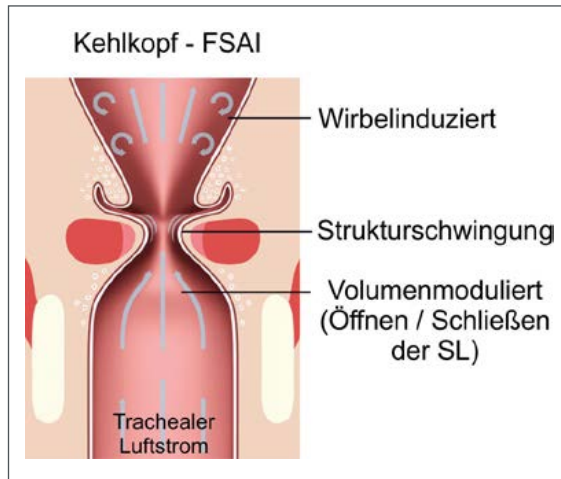


Abb. 1: Der Luftstrom trifft auf die zunächst geschlossenen Stimmlippen (SL) und regt diese zur Schwingung an. Durch das Öffnen und Schließen der Stimmlippen entsteht ein pulsierender Luftstrom der den Grundton der Stimme erzeugt. Zusätzlich entstehen Wirbel die zum Grundton als auch zum Rauschanteil des Signals beitragen können. Die Strukturschwingungen der Stimmlippen sind die dritte Komponente, die zum akustischen Grundsignal der Stimme beiträgt.

also je kleiner der Wirbel, desto höher die Frequenz des erzeugten Schalls. Diese wirbelinduzierten Schallanteile tragen einerseits zum Grundton und den Harmonischen bei und andererseits auch zu den in der Stimme vorkommenden Rauschkomponenten (nicht-harmonischer Anteil). Den dritten Beitrag bildet der vibrationsinduzierte Schallanteil, welcher durch die schwingenden Stimmlippen entsteht (wie die schwingende Membran eines Lautsprechers). Dieser Anteil spielt hinsichtlich der Schallerzeugung eine untergeordnete Rolle und kann in mathematischen Modellen vernachlässigt werden. Somit kann festgehalten werden, dass der Stimmgebungsprozess ein aeroakustisches Phänomen ist.

Die aktuelle Auffassung über die Stimmstehung besagt, dass eine gesunde also physiologische Stimme durch periodische, links-rechts symmetrische Stimmlippenschwingungen mit vollständigem Glottisschluss charakterisiert ist. Glottisschluss heißt, dass der Spalt zwischen den Stimmlippen (auch Stimmlitze genannt) während der Oszillation vollständig schließt. Eine funktionelle Stimmstörung, wahrnehmbar als heisere, raue oder behauchte Stimme, wird hingegen durch aperiodische, links-rechts asymmetrische Stimmlippenschwingungen bzw. einer vorhandenen Glottisschlussinsuffizienz charakterisiert [4, 5, 6]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Stimme bzw. Phonation aus einer komplexen Fluid-Struktur-Akustik Interaktion (FSAI), wie in Abbildung 2 dargestellt, resultiert. In den letzten Jahren wurden zwei Herangehensweisen

favorisiert, um diese FSAI innerhalb der Stimmgebung zu untersuchen und zu verstehen:

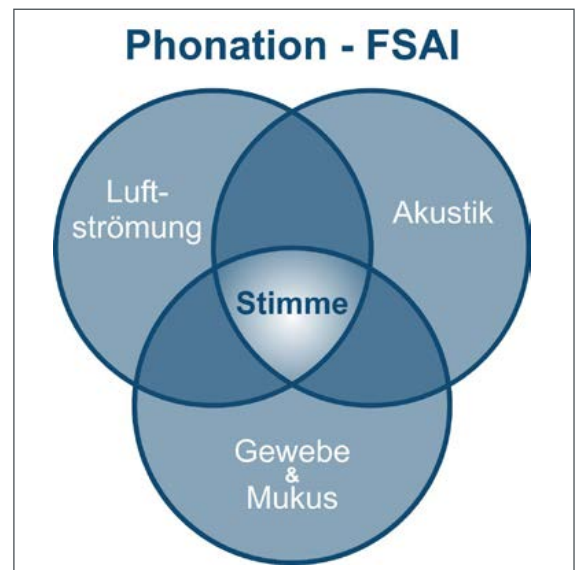
- Simulationsmodelle basierend auf den der Physik zugrundeliegenden Gleichungen der Strömungsmechanik, Strukturmechanik und Akustik.
- Experimentelle Modelle, bestehend aus nachgebauten Silikon-Stimmlippen, die durch eine künstlich erzeugte Luftströmung zum Schwingen angeregt werden. Zusätzlich kommen Stimmlippenmodelle zum Einsatz, deren Strukturbewegung extern aufgeprägt wird.

Diese beiden Ansätze sind je nach Ausrichtung der zu analysierenden Komponenten mehr oder weniger detailgetreu. Detailliertere Modelle berücksichtigen beispielsweise die Taschenfalten oder den für die finale Tonerzeugung nicht zu vernachlässigbaren supraglottalen Trakt. Der vorliegende Artikel gibt eine Übersicht über die aktuellen Modellierungsansätze, die dazu verwendet werden, den Prozess der Stimmgebung im Allgemeinen und im speziellen die FSAI innerhalb dieses Prozesses zu untersuchen.

Simulationsmodelle

Das primäre physikalische Feld der Stimmgebung ist das räumliche und zeitlich veränderliche Strömungsfeld. Dieses Feld mit den Beschreibungsgrößen Geschwindigkeit $v(x,t)$, Druck $p(x,t)$ und Dichte $\rho(x,t)$, welche eine Funktion des Ortes x und der Zeit t sind, wird durch die Grundgleichungen der Strömungsmechanik – Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie sowie den konstitutiven Gesetzen – beschrieben. Die Gleichungen sind in der Lage sowohl die Strömung als auch den entstehenden Schall (aufgrund der kompressiblen Beschreibung des

Abb. 2: Stimme als Ergebnis einer komplexen FSAI bestehend aus der Interaktion von Luftströmung (Fluid), Stimmlippengewebe (Struktur) und Akustik



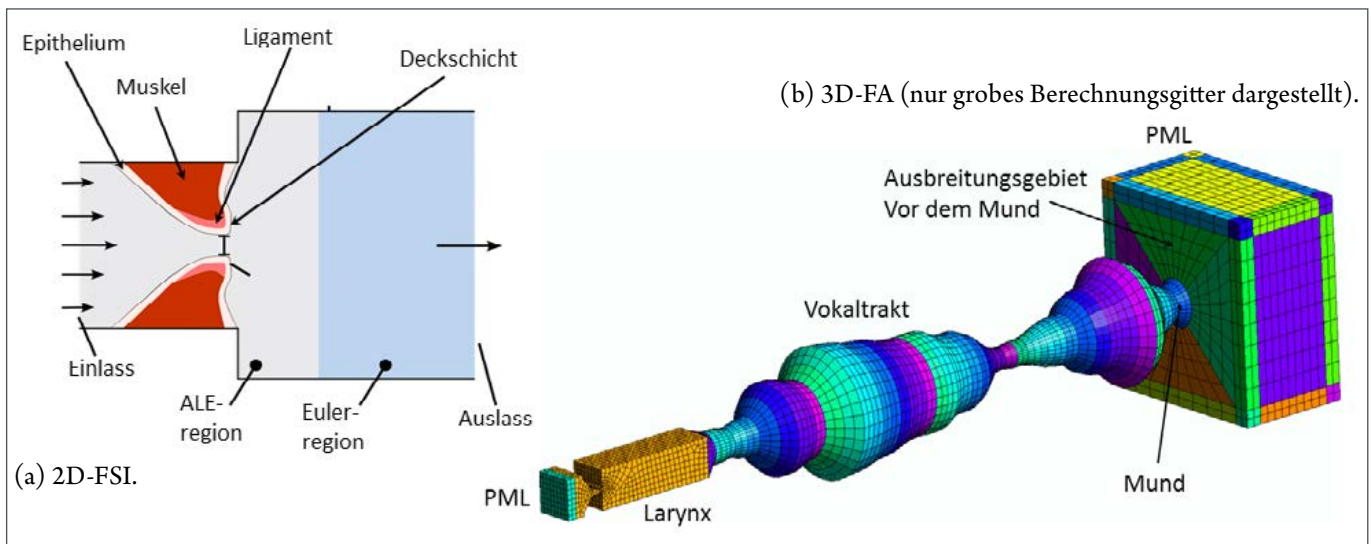


Abb. 3: Zwei unterschiedliche Modellansätze: 2D Fluid-Struktur-Interaktion und 3D Fluid-Akustik

Fluids) und deren Ausbreitung zu modellieren. Die Schwingungen der Stimmlippen werden durch biomechanische Grundgleichungen mit der primären physikalischen Größe mechanische(r) Auslenkung $u(x,t)$ modelliert. Die biologische Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) berücksichtigt einerseits die Strömungskräfte auf die Stimmlippen und andererseits das sich ständig ändernde Strömungsgebiet durch die schwingenden Stimmlippen, welches beim Glottisschluss sogar zu einem kompletten Abbruch des Volumenstroms durch die Stimmlippen führt. Das gekoppelte Gleichungssystem ist stark nichtlinear, womit eine numerische Lösung sehr zeitaufwendig ist. Bei hochaufgelösten Simulationen, welche die Physik dieser Interaktion abbilden kann, ist hier von mehreren Monaten Rechenzeit auf einem Supercomputer auszugehen [7, 8].

Dabei ist zu erwähnen, dass es derzeit noch kein realitätsnahes Materialmodell für den schichtartigen Aufbau der Stimmlippen gibt. Ein vereinfachtes Modell ist in Abb. 3a zu sehen, welches die vier Schichten Epithelium, Lamina propria, Ligament und Muskel berücksichtigt. Dabei wurde die Mukus-Schicht, welche für die Funktionsweise einer gesunden Stimme von entscheidender Bedeutung ist [9, 10, 11], hier nicht berücksichtigt. Aktuell gibt es noch keinen robusten Algorithmus, welcher das mechanische Kontaktproblem der sich schließenden Stimmlippen in Kombination mit der Luftströmung numerisch lösen kann. Um dennoch physikalische Erkenntnisse über die komplexe FSAI zu gewinnen, wurden in den letzten Jahren folgende zwei Modellierungsansätze innerhalb unserer Forschungsgruppen entwickelt:

- 2D Fluid-Struktur-Interaktion (2D-FSI)
- 3D Fluid-Akustik (3D-FA).

Im ersten Fall werden die gekoppelten Strömungsmechanik-Strukturmechanik-Gleichungen in einem

Schnitt der Glottis gelöst und nur Anwendungsfälle simuliert, wo es zu keinem Kontakt der beiden Stimmlippen kommt [12, 13]. Dabei wird, wie in Abb. 3a dargestellt, der Aufbau der Stimmlippen mit 4 Schichten modelliert und das gekoppelte 2D-FSI Gleichungssystem mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) gelöst. Durch entsprechende Simulationen konnte gezeigt werden, dass die FSI auf eine Strömungssimulation mit vorgegebener Geometrieänderung im Bereich der Glottis, also Vorgabe der Stimmlippenschwingung, reduziert werden kann [14].

Der zweite Modellansatz – 3D Fluid-Akustik (3D-FA) – basiert zunächst auf der Tatsache, dass die bei der Stimme vorkommende Mach-Zahl sehr klein ist und somit die Strömung als inkompressibel beschrieben werden kann. Damit kann ein hybrider Aeroakustik-Ansatz verwendet werden [15]. Aus den inkompressiblen Strömungsdaten werden die akustischen Schallquellen berechnet, die die Eingangparameter für die Lösung der akustischen Wellengleichung bilden. Der wesentliche Vorteil von dreidimensionalen Modellen ist, dass nur damit die komplexen Strömungsverhältnisse im Kehlkopf realitätsnah berechnet werden können. Die realitätsnahe Simulation der Strömung ist deshalb von entscheidender Bedeutung, da sich aus diesen Ergebnissen die Schallquellen des Stimm- bzw. Singsignals ergeben. Zusätzlich soll erwähnt werden, dass erst durch die 3D-Geometrie eine reale Stimmlippenbewegung – Lateral-, Vertikal- und Longitudinalbewegung – vorgegeben werden kann. Abbildung 3b zeigt das Rechengebiet für einen derartigen Modellansatz. Dabei wird der Vokaltrakt durch Zylinder unterschiedlicher Durchmesser und Längen nachgebildet. Mit Hilfe einer PML (Perfectly Matched Layer) Technik kann das Simulationsgebiet für die akustische Berechnung begrenzt werden,

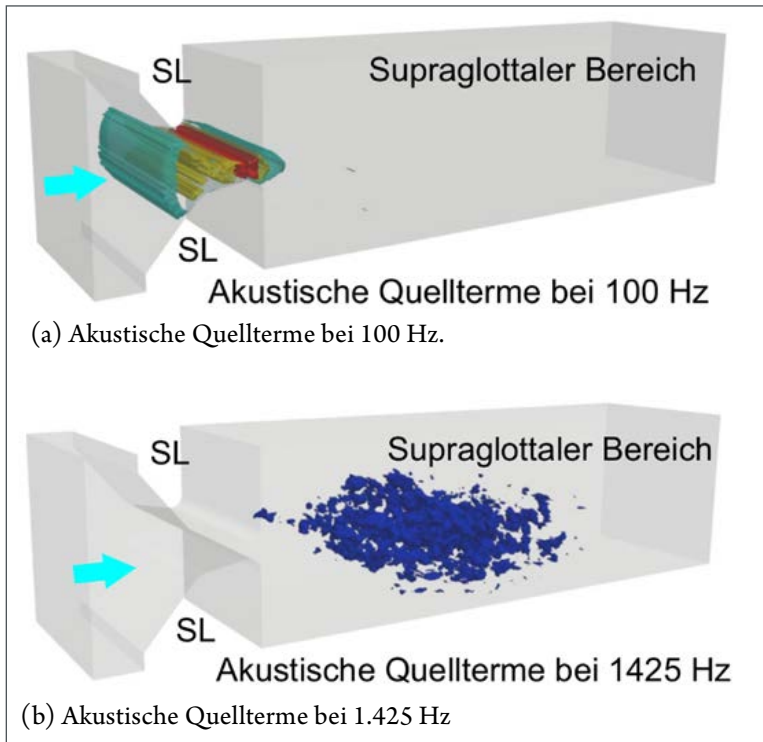


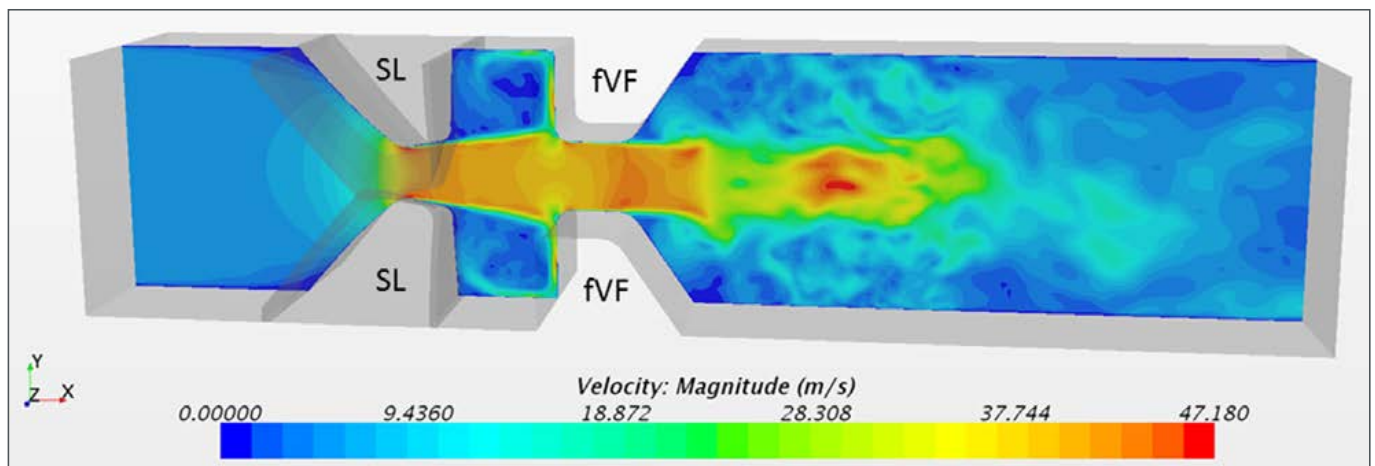
Abb. 4: Dreidimensionale numerische Simulation der Stimmgebung: Blauer Pfeil zeigt die Richtung der Luftströmung an, Stimmlippen (SL), Schallquellen: rot - sehr hohe Amplitude, blau - geringe Amplitude mit Rauschen.

ohne dass die akustischen Wellen reflektiert werden (Approximation der freien Schallausbreitung). Mit diesem Modellansatz konnten in den letzten Jahren wesentliche Beiträge zum besseren Verständnis der Stimmgebung erzielt werden. Mit dem in Abbildung 3b dargestellten numerischen Modell konnte gezeigt werden, dass die Hauptkomponenten der Grundfrequenz und deren Harmonische im und direkt oberhalb des Glottisspalts durch den volumenmodulierten Schallanteil erzeugt werden [13]. Die Rauschanteile im akustischen Signal werden zum Großteil aus den Luftwirbeln im Bereich oberhalb der Stimmlippen (supraglottaler Bereich) erzeugt.

Abbildung 4a zeigt die Hauptschallquellen im tiefen Frequenzbereich, die aus der pulsierenden Strömung entstehen, welche direkt im Bereich des Glottisspalts lokalisiert sind. Im höheren Frequenzbereich werden die Schallquellen durch die Wirbelstrukturen im supraglottalen Bereich maßgeblich bestimmt (siehe Abb. 4b). Die Frequenz des entstehenden Schalls ist indirekt proportional zur charakteristischen Wirbelgröße, also je kleiner der Wirbel desto höher ist die Frequenz des erzeugten Schalls. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass das Verhältnis zwischen harmonischen und nicht-harmonischen Komponenten im erzeugten Schall mit zunehmender Frequenz geringer wird, womit der Rauschanteil steigt.

In einer weiteren Studie basierend auf dem 3D-FA Modell wurden verschiedene Querschnitte der Glottis und damit Form der Stimmlippen untersucht [16]. Im Strömungsfeld findet man besonders zwischen dem rechteckförmigen und dem ellipsenförmigen Querschnitt große Unterschiede. So ist beim ellipsenförmigen Querschnitt das sogenannte „axis-switching“, des nach der Glottis entstehenden Jets zu beobachten, wie dies auch in [17] gefunden wurde. Das berechnete akustische Schalldruckspektrum im Bereich vor dem Mund zeigt dabei nur geringfügige Unterschiede. Zusätzlich wurde ein Fall mit einer einseitigen Stimmlippenparalyse untersucht, indem nur die Bewegung einer Stimmlippe vorgegeben wurde. Hier zeigte sich, dass die Amplituden bei den harmonischen Frequenzen sich deutlich reduzieren und die Amplituden bei den nicht-harmonischen Frequenzen zunehmen. Somit ist für eine gesunde Stimme nicht die Form der Stimmlippen von entscheidender Bedeutung, sondern der vollständige Glottisschluss. Abschließend sollen noch die Untersuchungen zu den Taschenfalten erwähnt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Taschenfalten zu einer Erhöhung der harmonischen Schallanteile im Stimmsignal führen [18, 19]. In Abbildung 5 ist das Strömungsfeld zu

Abb. 5: Berechnetes Strömungsfeld zu einem Zeitpunkt t bei Berücksichtigung der Taschenfalten (mit fVF gekennzeichnet).



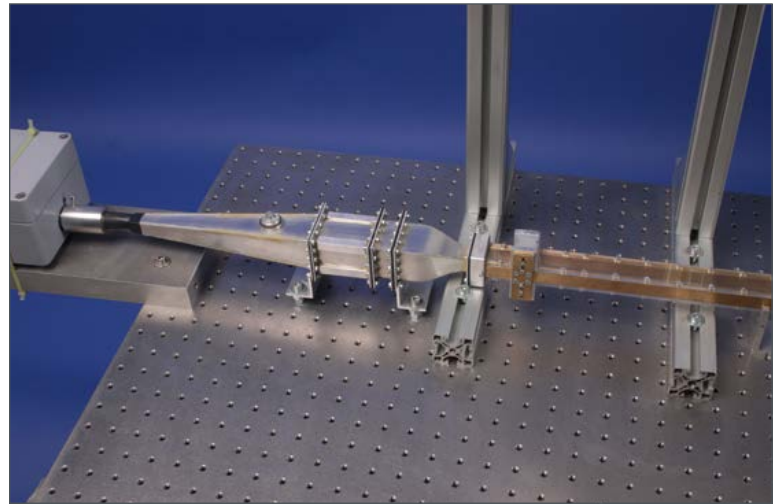


Abb. 6: Strömungsinduziertes selbstschwingendes Stimmlippenmodell (ohne Berücksichtigung von Taschenfalten und Vokaltrakt) in Beziehung zu einem Modell des Kehlkopfes

einem Zeitpunkt t im Schwingungszyklus dargestellt und die Analyse zeigte, dass der subglottale Druck für die Phonation in Anwesenheit der Taschenfalten deutlich gesenkt wurde. Als Ursache konnte der aerodynamische Bernoulli-Effekt identifiziert werden, der den Druckabfall bei hohen Geschwindigkeiten beschreibt. Dieser Druckabfall erstreckt sich ausgehend von der Glottis über die Ventrikel bis in den Spalt zwischen den Taschenfalten.

Experimente mit synthetischen Stimmlippen

Aufgrund der Tatsache, dass sich Messungen am lebenden Menschen nur sehr begrenzt durchführen lassen, wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt, die es ermöglichen, die grundsätzlichen physikalischen Mechanismen der menschlichen Stimmgebung im Experiment abzubilden. Es erfolgen Untersuchungen an Stimmlippenmodellen sowohl separat (siehe Abb. 6) als auch in Kombination mit Taschenfalten und Vokaltraktmodellen. Gleichzeitig liefern diese Modelle eine notwendige Validierungsbasis für die numerischen Berechnungen. Eine Übersicht über die verschiedenen Modellansätze ist in [20] zu finden.

Generell lassen sich die Modellansätze in zwei verschiedene Konfigurationen unterteilen. Es ergeben sich Untersuchungen

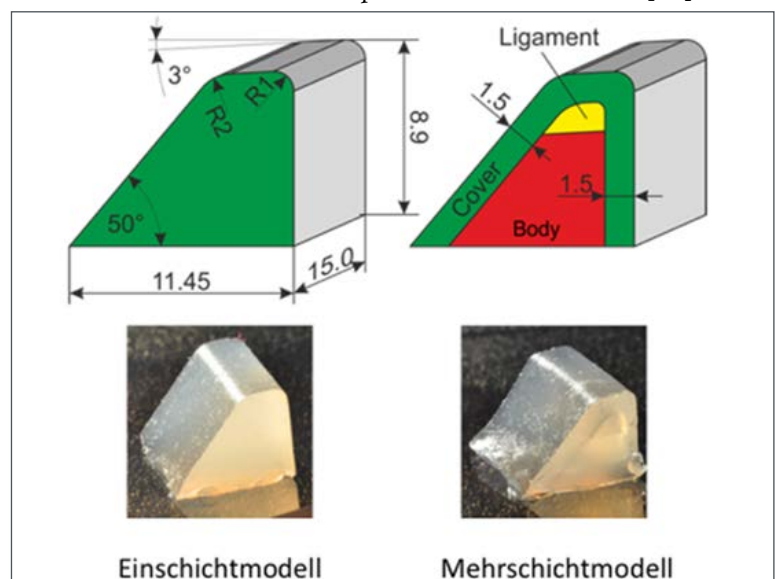
- an extern gesteuerten bewegten Stimmlippenmodellen und
- an durch die Strömung selbst schwingenden Stimmlippenkonfigurationen.

Im ersten Fall wird den Stimmlippen über eine externe mechanische Kraft und einen Übertragungsmechanismus eine definierte Bewegung aufgeprägt. Vorteile dieses Modelles sind, dass sich Schwingungsmuster, wie sie bei einer gesunden Stimme aber auch bei Krankheitsbildern auftreten, direkt auf das Modell

übertragen lassen. Daraus kann der direkte Zusammenhang zwischen den kontrollierten Schwingungsbewegungen der Stimmlippen und dem resultierten zeitabhängigen Geschwindigkeitsfeld ermittelt werden [21, 22]. Der Nachteil dieses Modellansatzes ergibt sich aus der Verletzung der Energiebilanz, da eine zusätzliche externe Kraft in den Stimmbildungsprozess eingebracht wird. Zusätzlich bildet das mechanische Antriebssystem der Stimmlippenbewegung eine Schallquelle.

Eine Alternative dazu bilden die strömungsinduzierten schwingenden Stimmlippenmodelle. Die Stimmlippen werden aus Silikon gefertigt und entsprechend ihrem Modellierungsgrad zum Aufbau der menschlichen Stimmlippen als Einschicht- und Mehrschichtmodelle eingesetzt. Abbildung 7 zeigt den Aufbau der Silikonstimmlippen. Bei einer entsprechenden Anpassung

Abb. 7: Aufbau der synthetischen Stimmlippen: Einschicht- und Mehrschichtmodelle. Die Geometrie entspricht dem Modellansatz in [23]



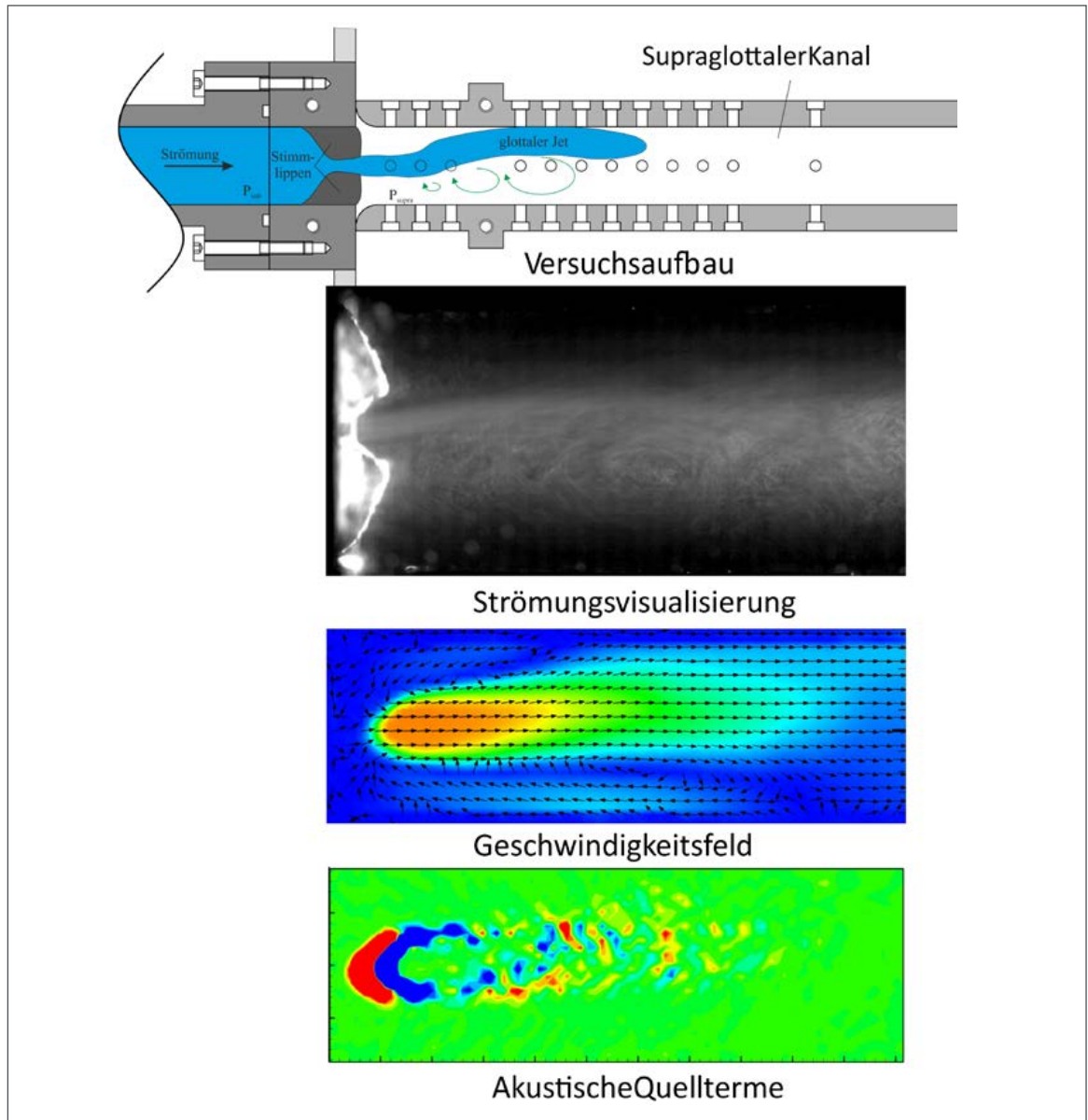


Abb. 8: a) Versuchsaufbau zu Untersuchungen an den synthetischen Stimmlippen; b) Strömungsvisualisierung; c) Geschwindigkeitsverteilung (daraus werden die akustischen Quellterme berechnet); d) akustische Quellterme bei Grundfrequenz von 120 Hz

sung des Elastizitätsmoduls lassen sich damit Schwingungsmuster und -frequenzen erzielen, die dem der menschlichen Stimme entsprechen.

Vorteile der Einschichtmodelle ergeben sich in der hohen Reproduzierbarkeit der Messungen. Mehrschichtmodelle ermöglichen eine bessere Anpassung der Schwingungsform im Vergleich zum menschlichen Phonationsprozess.

Diese Ersatzmodelle erlauben umfangreiche Forschungsarbeiten, um ein besseres physikalisches Verständnis der Stimmerzeugung unter Berücksichtigung von einer Vielzahl von Randbedingungen zu erzielen. Untersuchungsgegenstände sind u. a.

- Ursachen von Heiserkeit,
- Auswirkungen von Struktur- und Formänderungen in den Stimmlippen,

- Unterschiede in den Elastizitätsmodulen der Stimmlippenpaare
- Einfluss der Taschenfalten
- Interaktion mit dem Vokaltrakt
- Wirkungsmechanismen des Mukus.

Um dabei die gesamte Fluid-Struktur-Akustik Interaktion (Abb. 2) erklären zu können, ist der Einsatz einer Vielzahl von Messverfahren erforderlich. Das bedeutet auf Seiten der Strömungsmechanik, dass das Geschwindigkeits- bzw. das Druckfeld mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung zu erfassen sind. Hier werden vorrangig berührungslose Lasermessverfahren eingesetzt. So ermöglicht die Anwendung der PIV (Particula Image Velocimetry) eine Abtastung des Geschwindigkeitsfeldes in einer räumlichen Fläche bis zu 10 kHz.

In einem weiteren Schritt erfolgt aus den Geschwindigkeitsdaten die Berechnung der akustischen Quellterme des strömungsinduzierten Schalls hinter den Stimmlippenschwingungen. Detaillierte Informationen über die gesamte Methodik sind in [24] zu finden. In Abbildung 8 ist die gesamte Untersuchungskette abgebildet. Die Darstellung zeigt in Abb. 8a den Versuchsaufbau und in Abb. 8b die Strömung, welche die synthetischen Stimmlippen in Schwingung versetzt. Deutlich sind die Wirbelstrukturen des austretenden Freistrahls hinter den Stimmlippen erkennbar. In Abb. 8c sind die gemessenen Geschwindigkeitsvektoren dargestellt, welche mit PIV (Particle Image Velocimetry) ermittelt wurden. Aus diesen räumlichen und zeitlichen Verteilungen erfolgt die Berechnung der akustischen Quellterme, die in Abbildung 8d visualisiert sind. Markant ist, dass die Quellterme, die die Grundfrequenz und deren Höherharmonischen beinhalten, vorrangig in unmittelbarer Nähe hinter den Stimmlippen generiert werden. Die akustischen Quellterme bilden wiederum den Ausgangspunkt für die Lösung der Wellengleichung.

Die Berechnung erfolgt mit Hilfe eines Finite Elemente Verfahrens, und Abbildung 9 visualisiert das sich ergebende Schallfeld bei der Grundfrequenz. Damit konnte ein hybrides Verfahren aus Experiment und Simulation geschaffen werden, das es ermöglicht, komplementär zu dem globalen Simulationsansatz detaillierte Studien zum Phonationsprozess durchzuführen. Weiterführende Forschungsarbeiten ergeben sich in dem Zusammenschluss und der Interaktion der Stimmlippen mit dem Vokaltrakt (Abb. 10). Dabei kommen Geometrien nach [3] sowie jene, welche aus MRT (Magnet Resonanz Tomographie) gewonnen werden, zur Anwendung. Im Modellbau des Vokaltraktes werden hierfür moderne Verfahren des additiven 3D-Druckes benutzt.

Aus den bisherigen experimentellen Untersuchungen

Abb. 9: Berechnetes Schallfeld des akustischen Druckes aus den experimentellen Geschwindigkeitsmessungen; rot bedeutet positiver und blau negativer Schalldruck

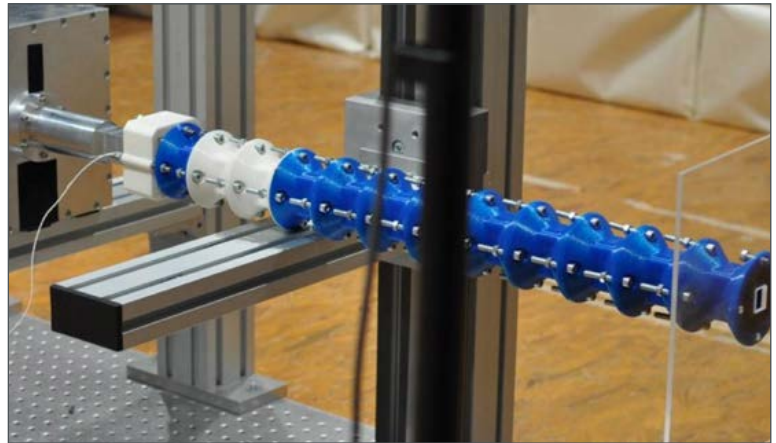
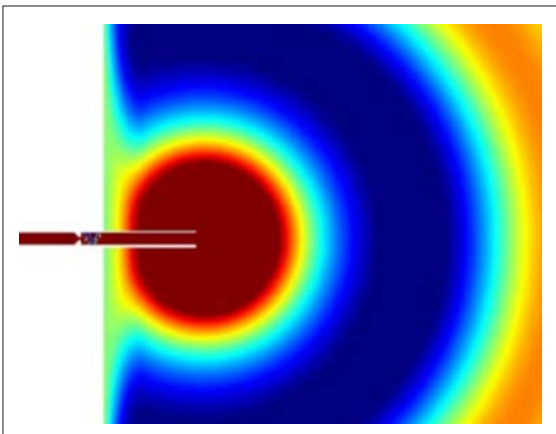


Abb. 10: Untersuchungen von Stimmlippenschwingungen in Verbindung mit dem Vokaltrakt

konnten u. a. folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Instabilitäten des Freistrahls unter dem Einfluss des supraglottalen Bereiches resultieren in zusätzlichen subharmonischen Beiträgen im Spektrum des Schallfeldes hinter den Stimmlippen [25].
- Der bisher in der Literatur postulierte Coundaefekt konnte für den Phonationsprozess widerlegt werden [23].
- In Abhängigkeit vom subglottalen Druck ergeben sich Schwingungszyklen mit und ohne Glottisschluss [26].
- Begrenzte Unterschiede in den Strukturelastizitäten der Stimmlippenpaare werden durch den Glottisschluss in der Schwingung synchronisiert [27].
- Durch die Taschenfalten erfolgt eine hydrodynamische Rückkopplung, welche den erforderlichen Druck zur Oszillation der Stimmlippen reduziert [28].
- Die zusätzliche Mukusschicht auf den Stimmlippen reduziert den erforderlichen subglottalen Druck sowie den Volumenstrom bei den Stimmlippenschwingungen [27], [11].
- In Abhängigkeit von der Geometrie des Vokaltraktes sind direkte akustische Rückkopplungen auf die Oszillationen der Stimmlippen beobachtbar [29].

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die FSAI weder in der gesunden noch gestörten Stimmgebung in allen Details verstanden wurde. Die in den letzten Jahren entwickelten numerischen Modelle und synthetischen experimentellen Herangehensweisen lassen jedoch Details und Zusammenhänge aufdecken, die bis dato weder bekannt noch so vermutet wurden. Eingesetzt werden hier komplexe Simulationsmethoden, die eine hohe Rechenleistung und einen hohen Grad an Modellbildung erfordern. Komplementär erzielen Weiterentwicklungen in den experimentellen Unter-

suchungsverfahren und in dem Modellaufbau Ergebnisse, deren Erkenntnisse sich auf den menschlichen Phonationsprozess übertragen lassen.

Damit wird es in Zukunft möglich, Therapieverfahren gezielt zu verbessern, aber auch neue Ansätze in der Behandlung von Stimmstörungen zu finden.

Ausblick

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich die folgenden nächsten Schritte, um weitere Details der FSAI bei der physiologischen und pathologischen Stimmgebung zu verstehen:

- Lösung des Kontaktproblems bei numerischen Simulationen.
- Berücksichtigung des Mukus und Analyse dessen Einfluss auf die Phonation.
- Berücksichtigung realistischer Stimmlippen- und Vokaltraktsgeometrien.
- Beschleunigung der numerischen Simulationen auf akzeptable Rechenzeiten.

Das Ziel der weiteren Untersuchungen muss sein, die gewonnenen Erkenntnisse auch in den klinischen Alltag zu übertragen. Damit sollen neue Behandlungsansätze bei pathologischen Fällen erarbeitet werden und die Möglichkeit zur Simulation von konservativen und chirurgischen Stimmbehandlungsmethoden erschlossen werden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (DO1247/10 - 1: no. 391215328) und dem Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) (Projektnummer I 3702) gefördert.

Literatur

- [1] Patel, R.; Dixon, A.; Richmond, A.; Donohue, K.: Pediatric high speed digital imaging of vocal fold vibration: a normative pilot study of glottal closure and phase closure characteristics. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 76: S. 954–959, July 2012.
- [2] Echternach, M.; Döllinger, M.; Sundberg, J.; Traser, L.; Richter, B.: Vocal fold vibrations at high soprano fundamental frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(2), EL82-EL87, 2013.
- [3] Story, B.: Structure, movement, sound, and perception. *Perspectives on speech science and orofacial disorders*, 24: S. 7–20, August 2014.
- [4] Chhetri, D.; Neubauer, J.; Bergeron, J.; Sofer, E.; Peng, K.; Jamal, N.: Effects of asymmetric superior laryngeal nerve stimulation on glottic posture, acoustics, vibration. *The Laryngoscope*, 123: S. 3.110–3.116, December 2013.
- [5] Yamauchi, A.; Yokonishi, H.; Imagawa, H.; Sakakibara, K.-I.; Nito, T.; Tayama, N.; Yamasoba, T.: Quantification of vocal fold vibration in various laryngeal disorders using high-speed digital imaging. *Journal of Voice*, 30: S. 205–214, March 2016.
- [6] Birk, V.; Kniesburges, S.; Semmler, M.; Berry, D.A.; Bohr, C.; Döllinger, M.; Schützenberger, A.: Influence of glottal closure on the phonatory process in ex vivo porcine larynges. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142: S. 2.197, October 2017.
- [7] Seo, J.H.; Mittal, R.: A High-Order immersed boundary method for acoustic wave scattering and Low-Mach number Flow-Induced sound in complex geometries. *Journal of Computational Physics*, 230(4): S. 1.000–1.019, 2011.
- [8] Tian, F.-B.; Dai, H.; Luo, H.; Doyle, J.F.; Rousseau, B.: Fluid-structure interaction involving large deformations: 3D simulations and applications to biological systems. *Journal of Computational Physics*, 258: S. 451–469, 2014.
- [9] Bhattacharya, P.; Siegmund, T.: A computational study of systemic hydration in vocal fold collision. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 17: S. 1.835–1.852, 2014.
- [10] Bhattacharya, P.; Siegmund, T.: The role of glottal surface adhesion on vocal folds biomechanics. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 14: S. 283–295, April 2015.
- [11] Döllinger, M.; Gröhn, F.; Berry, D.A.; Eysholdt, U.; Luegmair, G.: Preliminary results on the influence of engineered artificial mucus layer on phonation. *Journal of speech, language, and hearing research*, 57: S. 637–647, 2014.
- [12] Link, G.; Kaltenbacher, M.; Breuer, M.; Döllinger, M.: 2d finite-element scheme for fluid solid acoustic interactions and its application to human phonation. *Computer Methods in Applied Mechanics*, 198: S. 3.321–3.334, 2009.
- [13] Zörner, S.: Numerical simulation method for a precise calculation of the human phonation under realistic conditions. PhD thesis, Institut für Mechanik und Mechatronik, TU Wien, 2014.
- [14] Zörner, S.; Kaltenbacher, M.; Döllinger, M.: Investigation of prescribed movement in fluid-structure interaction simulation for the human phonation process. *Computers & Fluids*, 86: S. 133–140, 2013.
- [15] Kaltenbacher, M.; Escobar, M.; Becker, S.; Ali, I.: Computational aeroacoustics based on lighthill's acoustic analogy. In S. Marburg and B. Nolte, editors, *Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids*, chapter 4, pages 115 -

142. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-77447-1.
- [16] Zörner, S.; Sidlof, P.; Hüppe, A.; Kaltenbacher, M.: Flow and acoustic effects in the larynx for varying geometries. *Acta Acustica United with Acustica*, 102: S. 257–267, 2016.
- [17] Schwarze, R.; Mattheus, W.; Klostermann, J.; Brücker, C.: Starting jet flows in a three dimensional channel with larynx-shaped constriction. *Computers & Fluids*, 48: S.68–83, 2011.
- [18] Jo, Y.; Ra, H.; Moon, J.; Döllinger, M.: Three-dimensional Computation of Flow and Sound for the Human Hemilarynx. *Computer & Fluids*, 34-35: S. 41–50, 2016.
- [19] Sidlof, P.; Zörner, S.; Hüppe, A.: A hybrid approach to the computational aeroacoustics of human voice production. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 14: S. 473–488, 2015.
- [20] Kniesburges, S.; Scott, T.; Barney, A.; Trieb, M.; Sidlof, P.; Horacek, J.; Brücker, C.; Becker, S.: In vitro experimental investigation of voice production. *Current Bioinformatics*, 6(3): S. 305–322, 2011.
- [21] Kirmse, C.; Trieb, M.; Brücker, C.; Döllinger, M.; Stingl, M.: Experimental flow study of modeled regular and irregular glottal closure types. *Logopedies Phoniatries Vocology*, 35(1): S. 45–50, 2010.
- [22] Trieb, M.; Brücker, C.: Three dimensional nature of the glottal jet. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3): S. 1.537, 2010.
- [23] Becker, S.; Kniesburges, S.; Müller, S.; Delgado, A.; Link, G.; Kaltenbacher, M.; Döllinger, M.: Flow structure-acoustic interaction in a human voice model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(3): S. 1.351–1.361, 2009.
- [24] Lodermeier, A.; Tautz, M.; Becker, S.; Döllinger, M.; Kniesburges, S.; Birk, V.: Aeroacoustic analysis of the human phonation process based on a hybrid acoustic PIV approach. *Experiments in Fluids*, 1, 2018.
- [25] Kniesburges, S.; Lodermeier, A.; Becker, S.; Traxdorf, M.; Döllinger, M.: The mechanisms of subharmonic tone generation in a synthetic larynx model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(6): S.3.182–3.192, 2016.
- [26] Lodermeier, A.; Becker, S.; Döllinger, M.; Kniesburges, S.: Phase-locked flow field analysis in a synthetic human larynx model. *Experiments in Fluids*, 56(4), S 1–13, 2015.
- [27] Peters, G.; Lodermeier, A.; Becker, S.; Kutz, A.; Grön, F.: Einfluss der Stimmlippenoberfläche und asymmetrischer Elastizitätsmodule auf die Phonation. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2017*.
- [28] Kniesburges, S.; Birk, V.; Lodermeier, A.; Schützenberger, A.; Bohr, C.; Becker, S.: Effect of the ventricular folds in a synthetic larynx model. *Journal of Biomechanics*, 55, S. –133, 2017.
- [29] Fulcher, L.; Lodermeier, A.; Kniesburges, S.; Kähler, G.; Döllinger, M.; Becker, S.: Phonation threshold pressure and the properties of the vocal tract. *Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5), 2017. ■



Prof. Dr. Stefan Becker
*Friedrich-Alexander
Universität Erlangen-
Nürnberg*



Prof. Dr.-Ing. Michael Döllinger
*HNO-Klinik Erlan-
gen*



Prof. Dr. Manfred Kaltenbacher
*Technische Univer-
sität Wien*