

Multiple-mass simulation of the human vocal folds using elastic properties from measurements

Mario Otten¹, Frank Müller², Anna-Katharina Rohlf², Klaus Püschel³, Andreas Gömmel⁴, Markus Hess², Malte Kob¹

¹ *Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold, Email: otten@hfm-detmold.de*

² *Poliklinik für Hör-, Stimm- und Sprachheilkunde, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf*

³ *Institut für Rechtsmedizin, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf*

⁴ *Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH Aachen*

Einleitung

Die menschliche Stimme entsteht durch die Schwingung der Stimmlippen im Kehlkopf. Die komplexe Schwingung zeigt eine Abhängigkeit von vielen Faktoren wie etwa der Länge und Masse der Stimmlippen, der Elastizität der verschiedenen beteiligten Gewebearten (Mucosa, Muskelgewebe, Bänder, Knorpel etc.) und dem Volumenstrom der Luft, die beim Sprechen durch die Stimmlippen dringt.

Um diese Schwingung zu simulieren existieren verschiedene Modelle, z.B. das FE-Modell von Gömmel [1] oder das in dieser Untersuchung verwendete Mehrmassenmodell "Vox" von Kob [2], das eine Weiterentwicklung des 1973 von Titze [3] vorgestellten Modells ist.

In diesem Modell werden die Stimmlippen als eine Anordnung aus Massen, Federn und Dämpfern realisiert. Dabei wird die Stimmlippe in zwei Schichten aufgeteilt, die Deckschicht und den Körper. Die Deckschicht bildet die Schleimhaut (Mucosa, superfizielle und intermediäre Schicht), den Körper das Ligamentum vocale (Mucosa, tiefe Schicht) und der Musculus vocalis. Als Eingangsparameter für die Modelle wird die Elastizität D des Stimmlippengewebes benötigt, um daraus Werte für die Kopplung der einzelnen Elemente bestimmen zu können. Allerdings unterscheiden sich in diesem Punkt die Angaben in der Literatur stark, sie reichen von 0,5-4 kPa [4] bis 5-100 kPa [5].

Aus diesem Grund wurden eigene Messungen im Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) mit dem Linear Skin Rheometer (LSR) [7] durchgeführt, um die gewonnenen Daten für die Simulation zu nutzen. Bisher wurde für die Elastizität der Stimmlippen ein einzelner Wert genutzt, bei den Messungen konnte jedoch eine Abhängigkeit des Messwertes vom Messort und der Messrichtung festgestellt werden [8] siehe Abb. 1. Zur Validierung der simulierten Schwingung wurden Hochgeschwindigkeits-Glottographie (HGG)-Aufnahmen verwendet. Die zeitliche Auflösung von 2000-4000 Bildern/sec ermöglicht eine detaillierte Beobachtung der Stimmlippenschwingung.

Simulation in Vox

Die Elastizität des Stimmlippengewebes wurde in einem Raster aus 3x3 Punkten gemessen, eine Reihe von 3

Punkten entlang der Stimmlippenkante und 2 weitere Reihen in einem Abstand von 1,5 mm darunter. Für die Simulation in Vox konnten nur die 3 Messpunkte entlang der Stimmlippenkante genutzt werden, da nur dieser Bereich simuliert wird. Die weiteren Punkte wurden vermessen, um sie in einem 3 dimensional FE-Modell nutzen zu können [1]. Die Messungen wurden zunächst mit intakter Mucosa durchgeführt. Nach Entfernung von Mucosa wurde die Messsonde direkt auf dem Muskelgewebe angesetzt. Bei der Messung auf intakter Mucosa wird nicht nur die Mucosa allein, sondern auch das darunter liegende Muskelgewebe vermessen. Unter der Annahme, dass sich die Elastizität von Mucosa und Muskelgewebe wie seriell verbundene Federn verhalten, kann die Elastizität der Mucosa nach der Formel

$$D_{Mucosa} = \frac{D_{Muskel} \cdot D_{gesamt}}{D_{Muskel} - D_{gesamt}} \quad (1)$$

berechnet werden. Da der LSR als Ausgangswert das Verhältnis von Kraft und Auslenkung liefert, können die Ergebnisse direkt in Vox übernommen werden. Die gemessenen Werte sind in Abb. 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Messungen auf der Mucosa eine relativ kleine Standardabweichung zeigen, Messungen auf dem Muskelgewebe zeigen eine größere Streuung.

Allerdings ist eine Simulation mit nur 3 Massen nur bedingt sinnvoll. Es entstehen zwar stabile Schwingungen, da die Massen als Blöcke simuliert werden, bilden sich allerdings Kanten zwischen den Blöcken, die sich der realen Schwingungsform nur grob annähern. Werden mehr Massenelemente verwendet, kann die reale Schwingung genauer nachgebildet werden. Für diese zusätzlichen Massen fehlen jedoch entsprechende Federkonstanten. Bisher führte nur der in Abb. 1 gezeigte Verlauf der Elastizität zu einer stabilen Schwingung. Bei der Erzeugung wurde darauf geachtet, dass eine Kurve durch die verwendeten Werte differenzierbar ist und das der Durchschnittswert der Elastizität über die Elemente dem gemessenen Wert entspricht. Zum Vergleich sind in der Abbildung auch die bisher verwendeten, aus der Literatur übernommenen Werte für die Elastizitäten dargestellt.

Ergebnisse

In Vox konnte mit den gemessenen Parametern aus dem exzidierten Kehlkopf einer 38 jährigen Frau (Länge der

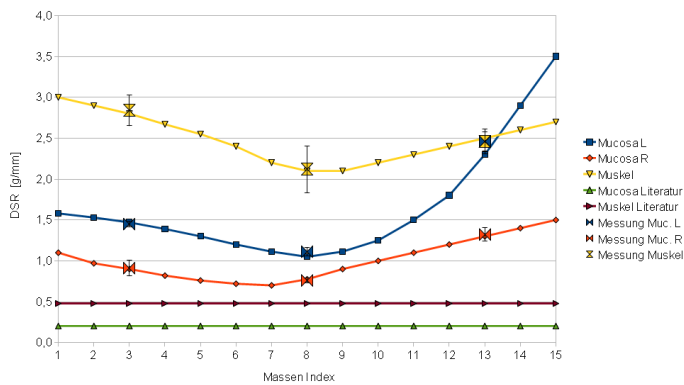


Abbildung 1: Verbundene Marker: Interpolierte Messwerte, Große Marker: Mittelwert aus 10 Messungen mit Standardabweichung

Stimmklappen 15mm) eine stabile Schwingung erzeugt werden. Die Grundfrequenz der erzeugten Schwingung betrug 276 Hz. Bei einer ähnlichen HGG Aufnahme (Probandin 30 Jahre, Länge der Stimmklappen ca. 15 mm) wurde aus dem Videomaterial eine Frequenz von 270 Hz ermittelt. Ein Vergleich der Auslenkung der Stimmklappe in ihrer Mitte zeigt ebenfalls einen ähnlichen Verlauf (vgl. Abb. 2 und 3)

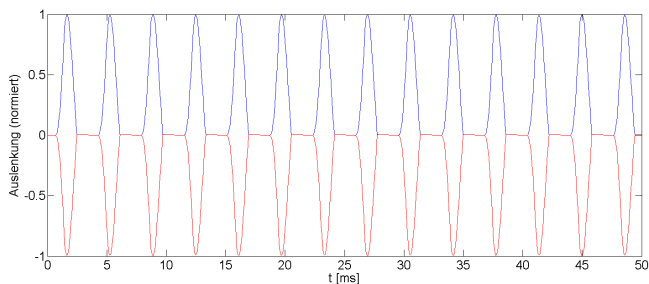


Abbildung 2: Ergebnis der Simulation

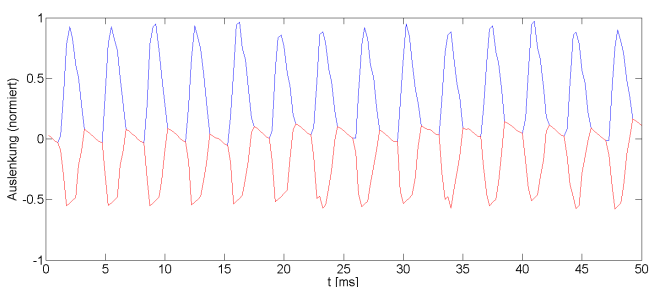


Abbildung 3: Werte aus HGG

Zusammenfassung, Ausblick

In dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass mit den gemessenen Parametern in einem Mehrmassenmodell eine stabile Schwingung ähnlich der natürlichen Schwingung erzeugt werden kann, und damit die Validität der Messungen stützt. Ein Vergleich der Spektren der Auslenkungssignale zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung der Messung mit der Simulation mit 15 Massenelementen (siehe Abb. 4). Obwohl bei der Extraktion des Stimmklappenabstandes aus dem Videomaterial

relativ starkes Rauschen auftritt, stimmen die Maxima der Graphen sehr gut überein. Werden weniger Massen verwendet weichen die Simulationsergebnisse von der natürlichen Schwingung ab. Die Ursache für dieses Verhalten muss noch weiter untersucht werden, bislang konnte auch durch Variation anderer Modellparameter (Subglottaler Druck, Vorspannung der Stimmklappen) keine deutliche Verbesserung erzielt werden. Bei einer weiteren Erhöhung der Anzahl der Massenelemente treten numerische Instabilitäten in der Berechnung der Schwingung auf [9]. Im nächsten Schritt werden die Messwerte in ein FE-Modell integriert, das höhere Anforderungen an die Eingangsdaten stellt und die Schwingung der Stimmklappen nicht nur in einer Ebene sondern dreidimensional nachbilden wird. Besonders die korrekte Umwandlung der Messwerte, die als Federkonstante ($[D] = N/m$) vorliegen, in die für die FE-Simulation benötigten richtungsabhängigen Scher- und Schubmodul stellt eine Herausforderung dar, da die eingeleitete Kraft das Gewebe komplex verformt und damit eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Kraft und Richtung der Auslenkung erschwert.

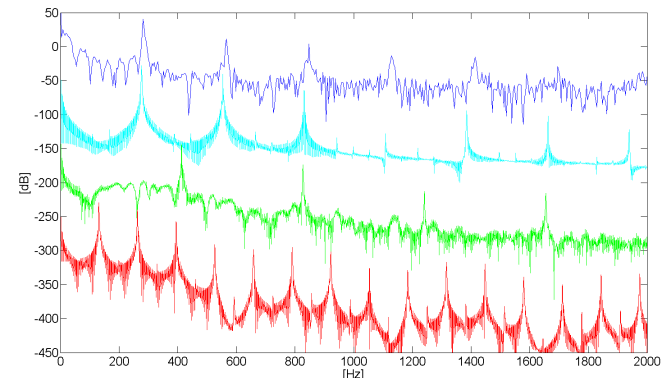


Abbildung 4: Spektren der Auslenkungen in der Stimmklappenmitte (oben aus HGG-Messung, folgend Simulation mit 15,9,3 Massen)

Literatur

- [1] A. Gömmel: Modellbildung und Fluid-Struktur-Interaktion in der Biomechanik am Beispiel der menschlichen Phonation, Diss. RWTH Aachen, 2010
- [2] M. Kob: Physical Modeling of the Singing Voice, Diss. RWTH Aachen, 2002
- [3] I.R. Titze: The Human Vocal Chords: A Mathematical Model, Part I, *Phonetica* 28, 1973, 129-170
- [4] E. Goodyer, N.V. Welham, S.H. Choi, M. Yamashita, S.H. Dailley: The shear modulus of the human vocal fold, preliminary results in a transverse direction, *J. of Voice* 2007, Vol. 23, No. 2 151-155
- [5] D.A. Berry, I.R. Titze: Normal modes in a continuum model of vocal fold tissues, *J. Acoust. Soc. Am.* 1996, 100, 3345-3354
- [6] E. Goodyer, S. Hemmerich, F. Müller, J.B. Kobler, M. Hess: The shear modulus of the human vocal fold, preliminary results from 20 larynxes. *Eur. Arch. Otorhinolaryngol* 2007; 264:45-50
- [7] P.G. Matts, E. Goodyer: A new instrument to measure the mechanical properties of the human stratum corneum. *J. Cosmet. Sci.* 1998;49:321-323
- [8] M. Otten, F. Müller, A.-K. Rohlfs, A. Gömmel, M. Hess, M. Kob: 3D Measurement of the vocal fold elasticity using the linear skin rheometer, *Proceedings DAGA Berlin 2010*
- [9] E. Loch: Stabile Modellierung schwingender Stimmklappen mit nicht-linearen Wellengleichungen, *Dipl. Arbeit RWTH Aachen 2008*