HERSTELLUNG UND CHARAKTERISIERUNG KÜNSTLICHER STIMMLIPPEN AUS SILIKONKAUTSCHUK

Peter Birkholz, Lin Wang

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Technische Universität Dresden
peter.birkholz@tu-dresden.de

Kurzfassung: In dieser Arbeit wurde untersucht, wie sich bei künstlichen Modellen der Stimmlippen aus Silikonkautschuk die Variation von zwei geometrischen Parametern und einem Materialparameter auf das Schwingungsverhalten und die Akustik des Stimmtons auswirkt. Dazu wurde für alle Kombinationen aus drei Stimmlippendicken (1, 2, und 3 mm), zwei Schrägen des Conus Elasticus (30 und 40 Grad), und zwei Elastizitätsmodulen des Material ("weiche" Modelle mit einem Elastizitätsmodul von 6.7 kPa und "harte" Modelle mit 16.4 kPa) jeweils ein Stimmlippenmodell angefertig und in einem Teststand untersucht. Für jedes Modell wurde der minimal notwendige Anblasedruck zur Initiierung der Schwingung, die Grundfrequenz, sowie das Harmonics-to-Noise Ratio (HNR) und der spektrale Abfall bestimmt. Der minimale Anblasedruck nahm monoton mit der Stimmlippendicke zu und war für die harten Modelle höher als für die weichen. Die Grundfrequenz hing ausschließlich vom Elastizitätsmodul des Materials ab. Für das HNR und den spektralen Abfall war keine systematische Abhängigkeit von den Einflussgrößen erkennbar. Im Vergleich zur menschlichen Stimme war das HNR jedoch meistens zu niedrig und der spektrale Abfall zu stark.

1 Einleitung

Der Stimmton wird durch die strömungsinduzierte Schwingung der Stimmlippen produziert, die wiederum durch die Stellung und die biomechanischen Eigenschaften der Stimmlippen bestimmt wird. Ein wichtiges Ziel der Stimmforschung ist es, die Abhängigkeit des Stimmklangs von den biomechanischen Eigenschaften der Stimmlippen zu quantifizieren [1]. Dies kann einerseits helfen, Stimmstörungen effektiver zu behandeln. Andererseits lässt sich damit das Verhalten numerischer Modelle der Phonation validieren, wie sie in der artikulatorischen Sprachsynthese verwendet werden [2].

Am lebenden Menschen lässt sich die Beziehung zwischen den biomechanischen Eigenschaften der Stimmlippen und dem Stimmklang schwer untersuchen, da sich die biomechanischen Parameter wie z.B. die Stimmlippendicke nicht exakt und unabhängig von anderen Parametern steuern lassen. Experimente an Kehlköpfen von Leichen sind alternativ möglich, jedoch weichen die Gewebeeigenschaften z.B. durch Austrocknung und fehlende Durchblutung von denen in lebenden Menschen ab. Ein Zweig der Stimmforschung beschäftigt sich daher mit *physischen* Modellen der Stimmlippen, deren Materialeigenschaften und Geometrie man gezielt variieren kann (z.B. [3, 4, 5]). Diese Modelle dienen nicht nur dem besseren Verständnis realer Stimmlippen, sondern können auch als akustische Anregung für mechatronische Sprechapparate eingesetzt werden (z.B. [6]). Dieser Artikel dokumentiert unsere ersten systematischen Versuche zur Entwicklung einer Stimmquelle für solche Sprechapparate.

Künstliche Stimmlippenmodelle lassen sich nach ihrem Aufbau in zwei Gruppen unterteilen: die erste Gruppe umfasst Modelle, die vollständig aus Elastomer bestehen (Vollgummi),

während die zweite Gruppe die Schleimhaut der Stimmlippen durch eine Flüssigkeit nachbildet, die durch ein dünne Membran (Epithel) aus Elastomer bedeckt wird. Modelle der zweiten Gruppe wurden bisher nur von [3, 7] hergestellt und untersucht. Ihre Herstellung ist relativ aufwändig, sie können aber bereits wie beim Menschen bei sehr niedrigen Anblasedrücken von ca. 200 Pa schwingen, was mit Modellen aus Vollgummi bisher nicht gelang.

Modelle aus Vollgummi sind relativ einfach durch Gießen einer flüssigen Gummimasse in eine Gussform herzustellen, in der diese dann vulkanisiert ("aushärten"). Als Elastomer wurde meistens Silikonkautschuk verwendet (z.B. [4, 5]), aber es kamen auch Polyurethan [8] oder thermoplastische Elastomere [6] zum Einsatz. Die Vollgummimodelle lassen sich in einschichtige und mehrschichtige Modelle unterteilen. Die einschichtigen Modelle bestehen vollständig aus dem gleichen Material mit einheitlicher Elastizität [8]. Die mehrschichtigen Modelle verwenden mehrere Schichten aus Elastomeren unterschiedlicher Elastizität, um den geschichteten Aufbau realer Stimmlippen nachzubilden [9]. Meistens wurden hier zwei Schichten für eine Body-Cover-Struktur hergestellt: Ein härteres Gummi für den tieferliegenden Teil bzw. den Vokalismuskel (Body), und ein weicheres Gummi für die außen befindliche Schleimhaut (Cover) [5, 10]. Xuan und Zhang [4] haben außerdem ein Modell mit einem einheitlich weichen Gummikörper für Body und Cover untersucht, auf den eine sehr dünne steifere Schicht zur Nachbildung des Epithels (Deckgewebe der Schleimhaut) aufgebracht wurde. In den letzten Jahren wurde auch versucht, die anisotrope Struktur der Stimmlippen nachzubilden, indem in dorso-ventrale Richtung dünne Fasern in die eigentlich isotropen Gummikörper eingebettet wurden [11, 4]. Dennoch verhält sich bisher kein synthetisches Stimmlippenmodell in allen Eigenschaften wie menschliche Stimmlippen.

In unserer Arbeit haben wir einschichtige Modelle aus Silikonkautschuk untersucht und bei diesen systematisch die Dicke der Stimmlippen, die Wandschräge des Conus Elasticus, und die Elastizität des Materials variiert. Während es zum Effekt der Stimmlippendicke und der Materialhärte bereits Erfahrungswerte aus der Literatur gibt, wurde der Effekt des Winkels des Conus Elasticus auf den Stimmton unseres Wissens nach bisher nicht untersucht. Für jede Modellvariante haben wir bestimmt, bei welchem Anblasedruck eine selbsterhaltende Schwingung mit welcher Grundfrequenz einsetzt. Außerdem haben wir von den produzierten Stimmtönen das Harmonics-to-Noise Ratio (HNR) und den spektralen Abfall bestimmt.

Tabelle 1 – Übersicht über die hergestellten Stimmlippenmodelle.

Bezeichnung	Härte	Dicke T (mm)	Winkel α (^{o})	Ruheöffnungsfläche (mm^2)
h-1-30	hart	1	30	5.91
h-2-30	hart	2	30	8.19
h-3-30	hart	3	30	0
h-1-40	hart	1	40	5.96
h-2-40	hart	2	40	0
h-3-40	hart	3	40	9.29
w-1-30	weich	1	30	1.52
w-2-30	weich	2	30	0
w-3-30	weich	3	30	0
w-1-40	weich	1	40	2.73
w-2-40	weich	2	40	0
w-3-40	weich	3	40	0

2 Methode

2.1 Herstellung der Stimmlippenmodelle

In dieser Arbeit haben wir 12 Modellvarianten hergestellt, die sich in ihrer Kombination von drei Parametern unterscheiden: der Dicke T der Stimmlippen (1, 2, und 3 mm), dem Winkel α der Seitenwände des Conus Elasticus (30° und 40° gegenüber der axialen Ebene) und dem Elastizitätsmodul E des Materials ("weiches" Material mit 6.7 kPa und "hartes" Material mit 16.4 kPa). Die Bezeichnung der Modellvarianten und ihre Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

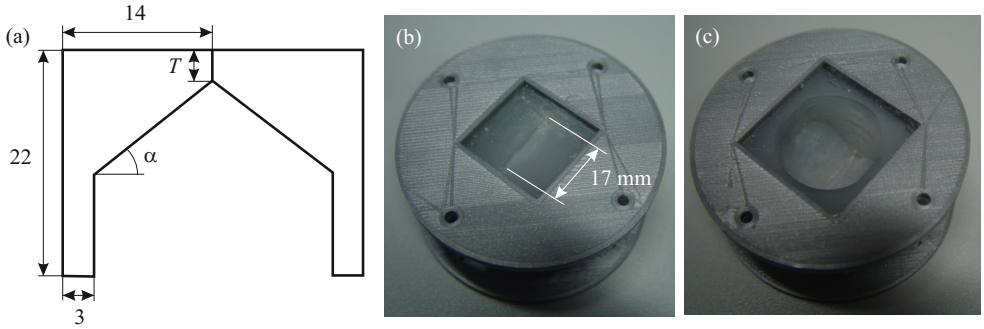

Abbildung 1 – (a) Maße der Stimmlippenmodelle im koronalen Schnitt in mm. (b,c) Ansicht der fertigen Stimmlippen im Gehäuse von schräg oben und schräg unten.

Die grundsätzliche Geometrie der Modelle orientiert sich an früheren Arbeiten [8, 5] und ist in Abbildung 1a im koronalen Schnitt mit den zwei Freiheitsgraden T und α dargestellt. Der vorgesehene Ruheabstand der Stimmlippen war 0 mm, so dass die linke und rechte Stimmlippe sich in der Ruhestellung berühren. Ursprünglich haben wir auch Modelle hergestellt, bei denen der Ruheabstand 1 mm oder 2 mm betrug. Diese Modelle schwangen jedoch überhaupt nicht, so dass wir sie hier nicht weiter betrachten. Die Länge der Stimmlippen war jeweils 17 mm und entspricht der durchschnittlichen Stimmlippenlänge von Männern [9].

Für jede Modellvariante wurde eine Gussform mit dem Programm FreeCAD (`http://www.freecadweb.org`) konstruiert und mit dem Material Polylactid (PLA) und der kleinstmöglichen Schichtdicke von 0.06 mm auf dem 3D-Drucker Ultimaker 2 der Firma Ultimaker (`https://ultimaker.com`) ausgedruckt. Abbildung 2 zeigt die Gussform für eines der Modelle. In die Mitte der Gussformen wurde nach dem 3D-Druck vertikal eine 0.5 mm dünne Folie zur Trennung der linken und rechten Stimmlippen eingesetzt (der Schlitz dafür ist in Abbildung 2b zu erkennen). Als Stimmlippenmaterial wurde additionsvernetzender Zwei-Komponenten Silikonkautschuk der Marke Ecoflex 00-30 der Firma Smooth-On (`www.smooth-on.com`) sowie Silikonöl (Silicone Thinner) der gleichen Firma als Verdünner verwendet. Für die "harten" Stimmlippenmodelle wurden die zwei Komponenten und der Verdünner im Gewichtsverhältnis 1:1:1 gemischt, und für die "weichen" Modelle im Verhältnis 1:1:2. Die Mischungen wurden in die jeweiligen Formen gegossen und vulkanisieren gelassen.

Die Elastizitätsmodule der zwei Mischungen im vulkanisierten Zustand wurde anhand von separaten Materialproben mit einer früher entwickelten Apparatur bestimmt [12]. Für das weiche Material wurde $E_{\text{weich}} = 6.7$ kPa gemessen und für das harte Material $E_{\text{hart}} = 16.4$ kPa. Messungen an Schleimhäuten realer menschlicher Stimmlippen [13] haben ergeben, dass ihr Elastizitätsmodul für kleine Ausdehnungen (< 15%) ca. 30 kPa in longitudinale Richtung beträgt, und ca. 1 kPa in transversale Richtung. Da für die Schwingung der Stimmbänder im un-

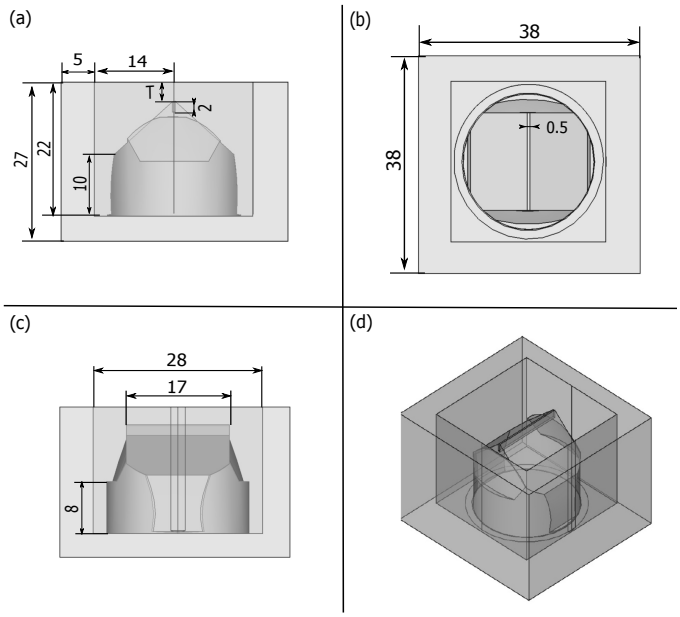

Abbildung 2 – Dreitafelprojektion und 3D-Projektion der Gussform für eine Modellvariante (alle Maße in mm).

gespannten Zustand der transversale Elastizitätstmodul von 1 kPa maßgeblich ist, sind die hier hergestellten Modelle deutlich "steifer" als reale Stimmlippen. Von einer weiteren Verdünnung der Silikonmischung für potentiell weichere Modelle wurde jedoch abgesehen, da sie nach der Vulkanisierung eine stark klebrige Oberfläche beibehalten würden.

Nach der Vukanisierung der Silikonkörper wurden diese vorsichtig aus den Gussformen herausgelöst und mit Silikonkleber zur Stabilisierung und zum Anschluss der "Luftröhre" in Gehäuse eingeklebt. Abbildung 1b und c zeigen ein solches Gehäuse mit dem eigeklebten Gummikörper von schräg oben und unten. Da die weichen Modelle eine leicht klebrige Oberfläche hatten, wurden sie mit fein gemahlenem Kreidepulver eingepudert, was die Klebrigkeit jedoch nicht vollständig beseitigen konnte. Nach der Entfernung der Folie zur Trennung der linken und rechten Stimmlippen wurde die Ruheöffnungsfläche der Stimmritzen der Modelle anhand von Fotos bestimmt. Diese sind in Tabelle 1 angegeben und variieren durch den manuellen Herstellungsprozess von 0 bis 9 mm^2.

2.2 Charakterisierung der Stimmlippenmodelle

Zur Charakterisierung der Modelle wurde der in Abbildung 3 gezeigte Messaufbau in einem reflexionsarmen Raum eingerichtet. Dieser besteht aus einem Belüfterkompressor (Typ LA-100A der Firma Nitto Kohki), der über einen Schlauch mit einem Puffer (Hohlraum mit $20 \times 20 \times 30$ cm^3 Volumen) verbunden ist. Vom Puffer wiederum führt ein Schlauch zum untersuchten Stimmlippenmodell. Dicht unterhalb des Modells ist ein digitales Druckmessgerät (Typ DMU4 der Firma Kalinsky Sensor Elektronik aus Erfurt) an den Schlauch angeschlossen, um den Anblasedruck zu messen. Da der Kompressor nicht regelbar ist, wurde am Puffer ein manuell stellbares Absperrventil angeschlossen, mit dem Luft über einen separaten Ausgang abgelassen werden konnte, um so den Anblasedruck zu regeln. Kompressor, Puffer und Ventil wurden in einer separaten Schallschutzkabine untergebracht, damit deren Geräusche die Messung der Stimmtöne nicht beeinflussen. Ein Messmikrofon (Typ M930 der Firma Microtech Gefell

GmbH) wurde 5 cm über den Modellen und leicht seitlich versetzt platziert, um die produzierten Stimmsignale mit 44.1 kHz und 16 Bit Quantisierung aufzuzeichnen. Zusätzlich wurde die Schwingung der Modelle mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Typ MQ013CG-ON der Firma Ximea mit einem Megapixel-Objektiv von TAMRON, 4-12 mm) mit einer Bildrate von 1443 Bildern/s und einer Auflösung von 256×256 im 24-Bit RGB-Modus aufgezeichnet.

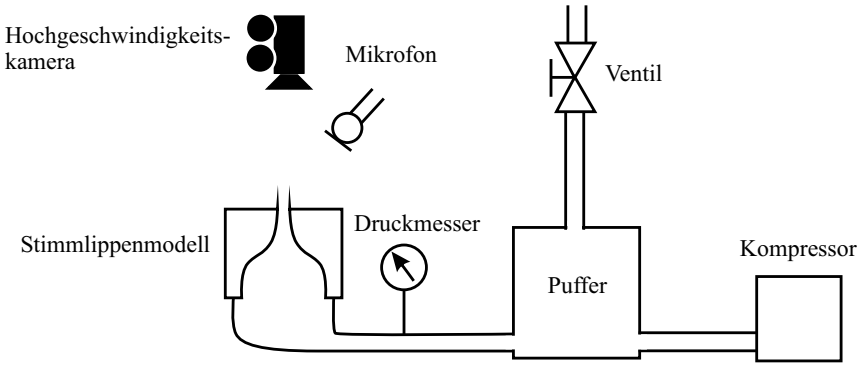

Abbildung 3 – Messaufbau zur Erfassung der Stimmlippenbewegung und des produzierten Schallsignals.

Für jede Modellvariante wurde zuerst der Anblasedruck bestimmt, bei dem die Stimmlippen zu schwingen beginnen. Dieser Druckschwellwert ist ein wichtiger Indikator für die "Leichtigkeit", mit der ein Modell eine Schwingung initiieren kann. Zur Messung wurde der Druck über das Ventil von 0 Pa in kleinen Schritten hochgeregelt, bis eine Schwingung einsetzte (auf Basis der Bilder der Kamera), oder der höchstmögliche Druck erreicht war.

Um die Grundfrequenz F_0 zu messen, wurde der Druck ausgehend vom Schwellwert um 0.1 kPa erhöht (damit sich die teilweise schwachen Schwingungen stärker ausprägten) und das Akustiksignal dazu für mehrere Sekunden aufgezeichnet. Die F_0 wurde dann mit der Software Praat (`http://www.fon.hum.uva.nl/praat/`, Version 5.3.39) als Mittelwert über eine Sekunde in der Mitte der Aufnahmen bestimmt.

Um die Stimmqualität der Modelle zu beurteilen, wurde das Harmonics-to-Noise Ratio (HNR) und der spektrale Abfall (Spectral Slope) bestimmt. Die Analyse wurde jeweils für Schallaufzeichnungen von ca. 10 s Dauer durchgeführt, die für die Modellvarianten bei verschiedenen Anblasedrücken gewonnen wurden (0.1 kPa über dem jeweiligen Druckschwellwert und bei weiteren Drücken in 0.1 kPa-Abständen darüber). Die Analysen wurden mit Praat entsprechend des von Mayer [14] beschriebenen Vorgehens durchgeführt. Dementsprechend wurde in Praat eine Aufnahme geladen, und dann `Analyse periodicity` → `To Harmonicity (cc)` ausgewählt. Für das dadurch entstandene Objekt wurde `Query` → `Get mean...` ausgewählt, um das HNR in dB auszugeben. Um den spektralen Abfall zu bestimmen, wurde ausgehend von der Aufnahme `Analyse spectrum` → `To Ltas...` ausgewählt, und auf dem dadurch erzeugten Objekt `Query` → `Get slope...` Als Parameter für alle Operationen wurden die Standardeinstellungen verwendet.

Aus den Videoaufzeichnungen wurde weiterhin mit der Software GlottalImageExplorer 1.0 [15] der Zeitverlauf der glottalen Öffnungsfläche bestimmt und analysiert, der hier aus Platzgründen aber nicht weiter betrachtet wird.

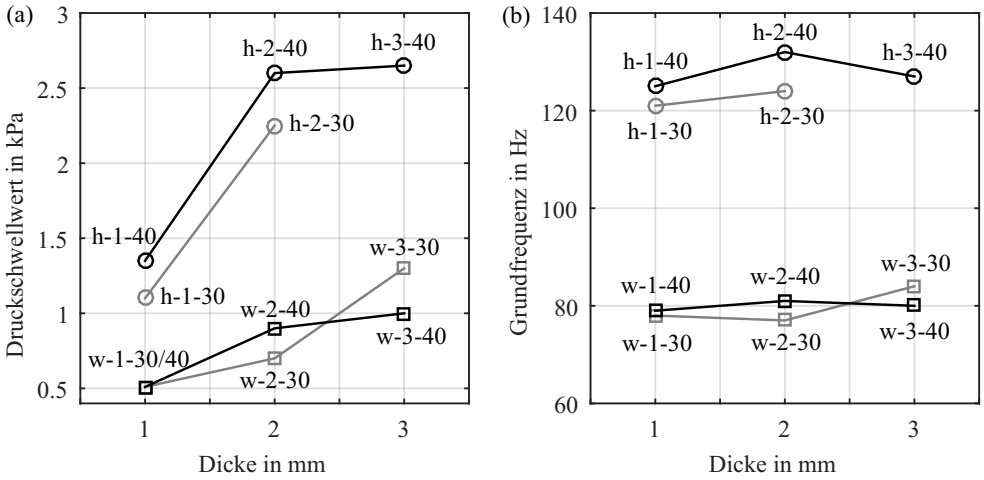

Abbildung 4 – (a) Druckschwellwert und (b) Grundfrequenz ca. 0.1 kPa oberhalb des Druckschwellwertes für alle Stimmlippenmodelle.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse für den Druckschwellwert und die Grundfrequenz sind in Abbildung 4 dargestellt. Bis auf das Modell h-3-30 waren alle Modelle zu Schwingungen in der Lage, wobei der Druckschwellwert für die weichen Modelle deutlich niedriger war als für die harten Modelle. Außerdem stieg der Druckschwellwert für harte und weiche Modelle mit zunehmender Stimmlippendicke T an. Der Einfluss des Winkels des Conus Elasticus auf den Druckschwellwert zeigt keinen klaren Trend. Da der Druckschwellwert bei menschlichen Stimmlippen zwischen 0.29 und 0.49 kPa liegt [16, S. 28], verhalten sich die Modelle w-1-30 und w-1-40 in dieser Hinsicht am natürlichsten.

Die F_0 der Modelle variiert weder systematisch mit der Stimmlippendicke T noch mit dem Winkel des Conus Elasticus. Dafür unterscheidet sie sich wesentlich zwischen den harten ($F_0 \approx 125$ Hz) und den weichen ($F_0 \approx 80$ Hz) Modellen. Da die Länge der Modellstimmlippen der eines männlichen Sprechers entspricht und der typische Grundfrequenzbereich für Männer zwischen 100 Hz und 146 Hz liegt [16], sind die harten Modelle in dieser Hinsicht natürlicher. Die F_0 veränderte sich bei allen Modellen nur geringfügig mit dem Anblasedruck, wie das Beispiel für das Modell w-2-40 in Abbildung 5a zeigt. Der Anstieg der Regressionsgerade durch die Messpunkte hat hier einen Anstieg von nur 2.63 Hz/kPa.

Die Ergebnisse der akustischen Analysen sind in Abbildung 5b dargestellt, wo die Kreise und die Quadrate für die Einzelmessungen der harten bzw. weichen Stimmlippen stehen. Bei diesen Messungen war keine systematische Abhängigkeit des HNR und des spektralen Abfalls von der Stimmlippendicke, dem Winkel des Conus Elasticus oder dem Anblasedruck erkennbar, so dass in der Abbildung nur nach der Materialhärte unterschieden wurde. Da die harten Modelle oft nur in einem kleineren Druckbereich schwangen, sind für diese weniger Messpunkte als für die weichen Modelle vorhanden.

Nach einer subjektiven perzeptiven Beurteilung waren die Stimmklänge der meisten Modelle arm an Obertönen und enthielten eine sehr starke Rauschkomponente. Insofern ist das HNR der Modelle als tendentiell zu gering und der spektrale Abfall als zu stark zu bewerten. Die zwei Messungen, die nach subjektiver Beurteilung (in Kombination mit verschiedenen angekoppelten Vokalresonatoren) am ehesten akzeptable Werte für das HNR und den spektralen Abfall aufwiesen, sind in Abbildung 5b eingekreist.

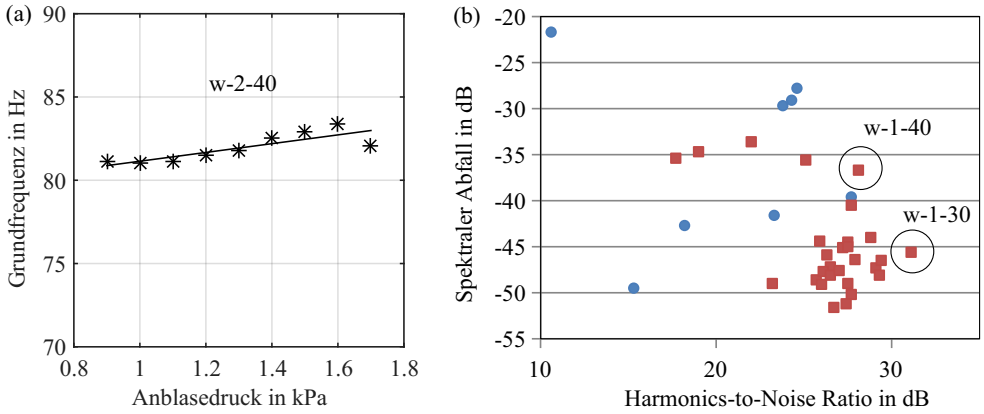

Abbildung 5 – (a) Abhängigkeit der Grundfrequenz vom Anblasedruck für das Modell w-2-40 (Sternchen). Die schwarze Linie ist die Ausgleichsgerade durch die Messpunkte. (b) Spektraler Abfall und HNR der Stimmlippenmodelle für verschiedene Anblasedrücke (nicht angegeben). Die harten Modelle sind durch Kreise und die weichen Modelle durch Quadrate gekennzeichnet.

Der unnatürlich starke spektrale Abfall des Stimmtons von isotropen Silikonstimmlippen ist aus früheren Arbeiten bekannt [4] und resultiert aus einer zu kurzen Verschlussphase oder einem unvollständigen Verschluss der Glottis innerhalb der Perioden. Die verhältnismäßig kurze Verschlussphase findet sich auch in unseren Videoaufnahmen der Stimmlippenschwingungen wieder. In den Aufnahmen in Abbildung 6 ist die Glottis jeweils nur in einem oder zwei der sechs dargestellten Bilder pro Periode vollständig geschlossen, während die Verschlussdauer der Glottis bei modaler Phonation eher 50% der Periodendauer beträgt.

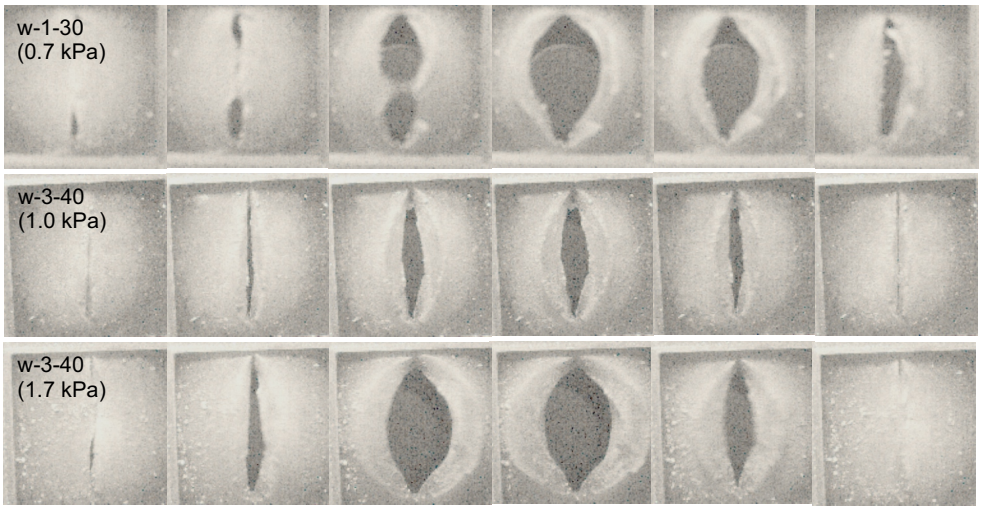

Abbildung 6 – Aufnahmen der Glottis während der Schwingung für verschiedene Modelle und Anblasedrücke. Jede Reihe zeigt eine Schwingungsperiode durch sechs Einzelbilder. In den Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera besteht jede der Perioden aus etwa 18 Einzelbildern. Hier ist jeweils jedes dritte Einzelbild der Aufnahmen dargestellt.

Isotrope Silikonmodelle haben auch das Problem, dass die Schwingungsamplitude der Stimmlippen bei hohen Drücken unnatürlich groß werden kann. Dies ist beispielhaft in den Aufnahmen in Abbildung 6 beim Vergleich der mittleren und unteren Reihe zu sehen (1.0 kPa

vs. 1.7 kPa Anblasedruck). Bei größer werdenden Öffnungflächen der Glottis nimmt auch die Rauschkomponente des Anregungssignals unnatürlich stark zu, was dann wie bei unseren Messungen zu einem geringen HNR führt (siehe Abbildung 5b).

Eine Besonderheit, auf die wir bei der Auswertung der Videobilder gestoßen sind, ist in der oberen Reihe in Abbildung 6 dargestellt. Hier ist erkennbar, dass sich die Glottis nicht "augenförmig" (elliptisch) geöffnet hat, sondern sich anfangs erst das obere und untere Drittel geöffnet haben, während die Stimmlippen im mittleren Drittel noch "zusammenklebten". Dieses Verhalten, dass wir bei mehreren Messungen verschiedener Modelle beobachten konnten, ist vermutlich auf die leicht klebrige Oberfläche der weichen Stimmlippenmodelle zurückzuführen und könnte ein Grund für die unsystematische Abhängigkeit der akustischen Parameter vom Anblasedruck und der Stimmlippendicke T sein.

4 Schlussfolgerungen

Auch wenn alle außer einem der untersuchten Modelle bei bestimmten Drücken zu Schwingungen in der Lage waren, so ähnelte ihr Verhalten natürlichen Stimmlippen nur begrenzt. Für einen niedrigen Anblasedruck wie bei realen Stimmlippen sollte das Material möglichst weich und die Stimmlippen möglichst dünn sein. Die weichen Stimmlippen in unseren Experimenten waren mit einem Elastizitätsmodul von 6.7 kPa immer noch deutlich steifer als die 1 kPa menschlicher Stimmlippen bei transversaler Auslenkung [13]. Wenn das Silikonkautschuk durch Zugabe von mehr Verdünner jedoch noch weicher gemacht wird, nimmt einerseits die Klebrigkeit der Oberfläche zu, die zu unvorhersagbaren Schwingungsmustern führen kann, und außerdem werden die Auslenkungen der Stimmlippen bei der Schwingung dann größer, was wiederum zu einem stärkeren Rauschanteil führt. Zur Vermeidung der klebrigen Oberfläche sollte analog zu [4] ein "Release Agent" auf die vulkanisierten Gummikörper gesprüht werden, oder auf den Gummikörper eine weitere dünne Deckschicht (Epithel) aus einer festeren (nicht-klebrigen) Silikonmischung aufzutragen werden, die gleichzeitig zu einem natürlicheren anisotropen Dehnungsverhalten führen könnte. Xuan und Zhang [4] haben gezeigt, dass eine zusätzliche steifere Deckschicht auch zu einem besseren Glottalverschluss und damit zu einem besserem akustischen Verhalten beiträgt. Zur Vermeidung unnatürlich großer Auslenkungen sollten Zwei-Schichten-Modelle wie in [10] mit einer festeren Body-Schicht und nur einer relativ dünnen und sehr weichen Cover-Schicht für die Schleimhaut verwendet werden. Diese Maßnahmen könnten folglich zu einem besseren akustischen Verhalten führen, d.h. einem höheren SNR durch geringere Stimmlippenauslenkung und einem geringeren spektralen Abfall durch einen besseren Glottalverschluss mit einer zusätzlichen steifen Deckschicht.

Literatur

[1] ZHANG, Z.: *Cause-effect relationship between vocal fold physiology and voice production in a three-dimensional phonation model. Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4), S. 1493–1507, 2016.

[2] BIRKHOLZ, P.: *A survey of self-oscillating lumped-element models of the vocal folds.* In B. J. KRÖGER und P. BIRKHOLZ (Hrsg.), *Studientexte zur Sprachkommunikation: Elektronische Sprachsignalverarbeitung 2011*, S. 47–58. TUDPress, Dresden, 2011.

[3] TITZE, I. R., S. S. SCHMIDT, und M. R. TITZE: *Phonation threshold pressure in a physical model of the vocal fold mucosa. Journal of the Acoustical Society of America*, 97(5), S. 3080–3084, 1995.

[4] XUAN, Y. und Z. ZHANG: *Influence of embedded fibers and an epithelium layer on the glottal closure pattern in a physical vocal fold model*. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 57(2), S. 416–425, 2014.

[5] MURRAY, P. R. und S. L. THOMSON: *Vibratory responses of synthetic, self-oscillating vocal fold models*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5), S. 3428–3438, 2012.

[6] FUKUI, K., Y. ISHIKAWA, E. SHINTAKU, M. HONDA, und A. TAKANISHI: *Production of various vocal cord vibrations using a mechanical model for an anthropomorphic talking robot*. *Advanced Robotics*, 26(1–2), S. 105–120, 2012.

[7] CHAN, R. W., I. R. TITZE, und M. R. TITZE: *Further studies of phonation threshold pressure in a physical model of the vocal fold mucosa*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(6), S. 3722–3727, 1997.

[8] THOMSON, S. L., L. MONGEAU, und S. H. FRANKEL: *Aerodynamic transfer of energy to the vocal folds*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3), S. 1689–1700, 2005.

[9] TITZE, I. R.: *Principles of Voice Production*. Prentice Hall, 1994.

[10] MENDELSOHN, A. H. und Z. ZHANG: *Phonation threshold pressure and onset frequency in a two-layer physical model of the vocal folds*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), S. 2961–2968, 2011.

[11] SHAW, S. M., S. L. THOMSON, C. DROMEY, und S. SMITH: *Frequency response of synthetic vocal fold models with linear and nonlinear material properties*. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(5), S. 1395–1406, 2012.

[12] WANG, L., S. PREUSS, und P. BIRKHOLZ: *Untersuchung elastischer Materialien für künstliche Stimmlippen*. In O. JOKISCH (Hrsg.), *Studientexte zur Sprachkommunikation: Elektronische Sprachsignalverarbeitung 2016*, S. 45–52. TUDPress, Dresden, 2016.

[13] ALIPOUR, F. und S. VIGMOSTAD: *Measurement of vocal folds elastic properties for continuum modeling*. *Journal of Voice*, 26(6), S. 816.e21–816.e29, 2012.

[14] MAYER, J.: *Phonetische Analysen mit Praat - Ein Handbuch für Ein- und Umsteiger*. lingphon.net, 2016. Handbuch-Version 2016/11.

[15] BIRKHOLZ, P.: *GlottalImageExplorer - an open source tool for glottis segmentation in endoscopic high-speed videos of the vocal folds*. In O. JOKISCH (Hrsg.), *Studientexte zur Sprachkommunikation: Elektronische Sprachsignalverarbeitung 2016*, S. 39–44. TUDPress, Dresden, 2016.

[16] BAKEN, R. J. und R. F. ORLIKOFF: *Clinical measurement of speech and voice*. Cengage Learning, 2000.