

# UNTERSUCHUNG ELASTISCHER MATERIALIEN FÜR KÜNSTLICHE STIMMLIPPEN

*Lin Wang, Simon Preuß und Peter Birkholz*

*Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Technische Universität Dresden  
lin.wang1@tu-dresden.de*

**Kurzfassung:** Zur Auswahl geeigneter Materialien für künstliche Modelle von Stimmlippen ist die Nachbildung der elastischen Eigenschaften der echten Stimmlippen von besonderem Interesse. Zur Überprüfung der Eignung verschiedener Materialien müssen ihre Zugspannungs-Dehnungs-Kurven bestimmt und mit der Kurve menschlichen Stimmlippengewebes verglichen werden. In dieser Arbeit stellen wir einen hierfür konzipierten Messaufbau und Messergebnisse an verschiedenen Materialproben vor. Die Materialproben aus kommerziell erhältlichem Zweikomponenten-Silikonkautschuk und Weichplastik wurden in verschiedenen Mischverhältnissen und Zusammensetzungen hergestellt. Jede der Proben wird in dem Messaufbau zwischen eine Wägezelle und einer Kreisscheibe fest eingespannt. Ein Elektromotor dreht die Kreisscheibe mit konstanter Geschwindigkeit und dehnt und entspannt so die Probe. Die Kraft wird durch die Wägezelle gemessen und das entstehende Signal verstärkt und digitalisiert. Nach Umrechnung erhält man die Zugspannungs-Dehnungs-Kurven der Proben aus den verschiedenen Materialien. Eine Probe aus Silikonkautschuk mit Zusatz von Silikonöl wurde als dem menschlichen Stimmlippengewebe sehr ähnlich identifiziert. Abschließend wird ein Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Schwingverhaltens von künstlichen Stimmlippen vorgestellt.

## 1 Einleitung

### 1.1 Stimmlippen in der Sprachproduktion des Menschen

Stimmlippen, auch unpräziser bekannt als Stimmbänder, sind zwei symmetrische Membranstrukturen, die sich im Kehlkopf horizontal von hinten nach vorne erstrecken. Sie vibrieren bei der Phonation und sind entscheidend für viele charakteristische Eigenschaften der Stimme, insbesondere die Grundfrequenz. Die Elastizität des Stimmlippengewebes ist ein Schlüsselfaktor in der Kontrolle der Grundfrequenz bei der Stimmbildung (s. [9]). Zur Beschreibung der Elastizität des Stimmlippengewebes von Menschen wird die Zugspannungs-Dehnungs-Kurve verwendet, die nach [2] als Exponentialfunktion mit Hysterese approximiert werden kann. Im Dehnungsbereich 0-15 % verläuft sie näherungsweise linear und der Elastizitätsmodul beträgt ungefähr 28 kPa [1].

### 1.2 Künstliche Stimmlippen in Wissenschaft und Technik

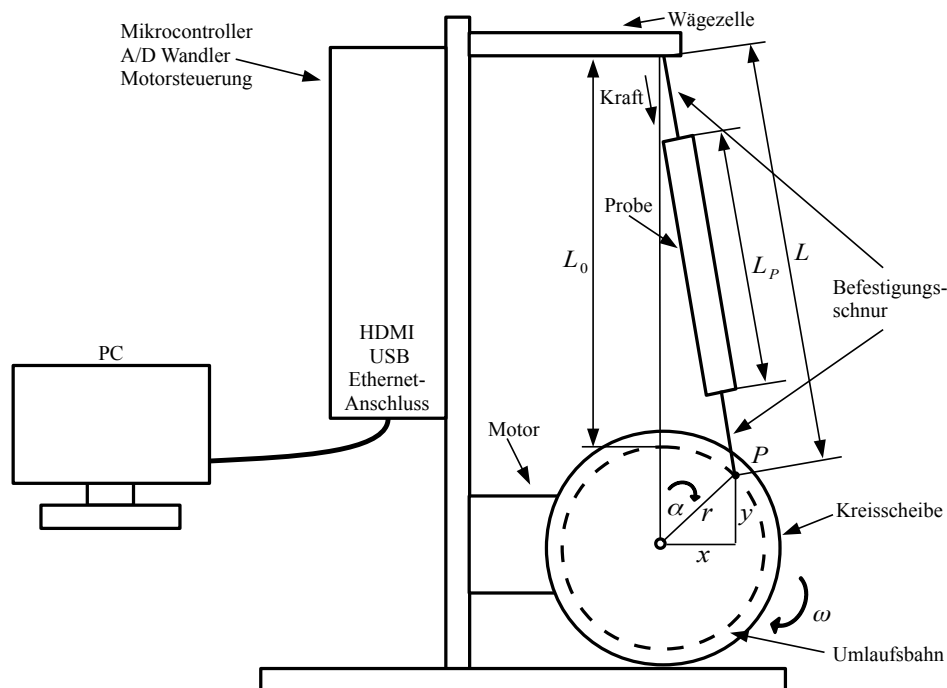
Phonation tritt als Folge von komplexer Kopplung zwischen aerodynamischen, strukturdynamischen und akustisch-physikalischen Phänomenen ein [5]. Durch künstliche Modelle von Stimmlippen lassen sich die Vorgänge bei der Phonation besser verstehen, was wichtig bei der klinischen Vorbeugung, Diagnose und Therapie von Stimmstörungen ist.

Eine Reihe von Modellen künstlicher Stimmlippen existiert in der Literatur für verschiedene

Anwendungen: So wird das mechanische Modell nach [4] bei der Untersuchung pathologischer Produktion der Stimme benutzt. Dieses "cover model" (sinngemäß: "Abdeckungsmodell") kann die Spannung der Stimmlippen und die Öffnung des Glottis imitieren. Das synthetische Modell nach [7] wird bei der Untersuchung aerodynamischer Übertragung der Energie zu den Stimmlippen verwendet. Die Geometrie dieses Einschichtmodells ist nach dem Vorbild von Modell M5 in [6] gewählt. Ein physikalisches Zweischichten-Modell aus [10] wird bei der Untersuchung des asymmetrischen Vibrierens mit links-rechts Steifheitsasymmetrie genutzt. Die Herstellung eines Modells mit mehreren Schichten unterschiedlicher Materialeigenschaften wird in [5] beschrieben, das die Mehrschicht-Struktur der menschlichen Stimmlippen nachbildet. Eine weitere wichtige Anwendung für künstliche Stimmlippen ist die Entwicklung von anthropomorphen, sprechenden Robotern (z.B. dem WASEDA-Talker [3]), bei denen Sprache durch ein mechanisches Vokaltraktmodell produziert wird, das durch künstliche Stimmlippen angeregt wird.

Als Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz einer künstlichen Stimmlippe muss überprüft werden, ob das infrage kommende Material die elastischen Eigenschaften der natürlichen Stimmlippen nachbilden kann. Hierzu wird in dieser Arbeit ein Messaufbau vorgestellt, der die Zugspannungs-Dehnungskurve einer Materialprobe aufnehmen kann und somit die Ermittlung des Elastizitätsmoduls für verschiedene Dehnungen erlaubt. Eine Reihe verschiedener Materialien wurde mithilfe dieses Aufbaus vermessen und die Ergebnisse im Weiteren vorgestellt.

## 2 Beschreibung des Messaufbaus



**Abbildung 1** - Skizze des Messaufbaus. Der Motor dreht die Kreisscheibe, wodurch die Probe gedehnt wird. Die wirkende Kraft wird durch die Wägezelle aufgenommen und der entstehende Messwert durch den Mikrocontroller vorverarbeitet und an den PC zur weiteren Auswertung weitergegeben.

In dem hier vorgestellten Messaufbau (vgl. Abb. 1) kann bei einer kontrollierten Dehnung die Zugspannung einer Materialprobe aufgenommen werden. Der Messaufbau besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: (1) mechanische und elektronische Komponenten zur kontrollierten Dehnung der Proben und zur Aufnahme der resultierenden mechanischen Spannung und (2) Auswertungssoftware zur Verarbeitung und Visualisierung der Daten.

## 2.1 Mechanische und elektronische Komponenten

Der Messaufbau wird in Abbildung 1 schematisch dargestellt und besteht aus den folgenden Komponenten:

- **Wägezelle:** Die Wägezelle vom Typ P4B2 nimmt am Eingang eine Kraft (Messbereich bis 100 N) auf und wandelt sie am Ausgang in eine kleine analoge Spannung (bis 20 mV). Die Probe wird mithilfe einer Klemme und eines unelastischen Fadens fest am Eingang der Wägezelle befestigt.
- **Elektromotor:** Die Achse des Motors (Typ: MY2007U222) dreht sich während einer Messung kontinuierlich und mit einstellbarer konstanter Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit kann durch die Veränderung der Betriebsspannung gesteuert werden.
- **Kreisscheibe:** Die Kreisscheibe mit dem Durchmesser 75 mm sitzt mittig auf der Spindel des Motors. Im Abstand  $r = 35$  mm zum Kreismittelpunkt wird die Probe ebenfalls mithilfe einer Klemme und eines unelastischen Fadens befestigt, so dass sie in der Ruheposition der Kreisscheibe ungespannt und senkrecht zwischen Wägezelle und Befestigungspunkt hängt.
- **Halterung:** Das Gestell ist aus Aluminium. Die Halterungen der einzelnen Komponenten werden mittels eines 3D-Druckers (Typ: Ultimaker 2) aus einem Kunststoff (PLA) gedruckt.
- **Mikrocontroller:** Der Raspberry Pi 2 B ist ein kreditkartengroßer Einplatinenrechner von Broadcom mit einem ARM-Mikroprozessor, der ein mit 900 MHz getaktetes System und 1024 MByte Arbeitsspeicher besitzt. Das Board verfügt über einen HDMI-Anschluss, an den im Messaufbau ein Bildschirm angeschlossen wird. Nutzereingaben sind durch eine über USB verbundene Maus und Tastatur möglich. Über die ebenfalls auf dem Board vorhandene Ethernet-Schnittstelle werden die Daten auf Nutzerabruf an einen PC weitergeleitet. Von den 40 Ein-/Ausgabepins des Boards werden 30 zur Ansteuerung des A/D Wandlers, der Motorsteuerung (beides s. u.) und des auf dem Board befindlichen 2.8"-Displays verwendet. Das Display zeigt die momentan auf die Wägezelle wirkende Kraft an. Des Weiteren bietet der Raspberry Pi 2 B auch noch einen Videoausgang und einen Audioausgang, die allerdings in diesem Aufbau keine Verwendung finden.
- **Analog/Digital Wandler:** Durch den 24-bit A/D Wandler HX711 von AVIA Semiconductor wird das analoge Spannungssignal der Wägezelle um den Faktor 128 verstärkt und digitalisiert. Die Abtastrate ist 80 Hz.
- **Motorsteuerung:** Die Geschwindigkeit des Motors (und damit die Frequenz, mit der die Probe harmonisch gespannt und entspannt wird) kann durch den Motorcontroller (Typ: TradeFlex 204915) und einen Flugregler (Typ: Modelcraft MC-40A) gesteuert werden. Der Motorcontroller erzeugt Pulse verschiedener Breite, die durch eine Drehregler verändert werden kann. Diese Pulse werden durch den Flugregler verstärkt und in eine Betriebsspannung des Motors umgesetzt: Je breiter der erzeugte Puls ist, desto höher wird die Betriebsspannung geregelt und desto schneller dreht sich der Motor.
- **PC:** Ein handelsüblicher PC dient zur Weiterverarbeitung und Darstellung der Messdaten: Nach Abschluss einer Messung wird auf Nutzerabruf der Messwertspeicher des Mikrocontroller-Boards über Ethernet auf den PC übertragen.

## 2.2 Software

Das Betriebssystem des Raspberry Pi 2 B, Raspbian Wheezy, ist Linux-basiert. Der Controller kann mit Python, aber auch alternativ C, C++ oder Java programmiert werden. In dieser Ar-

beit wurde C verwendet. Das Programm zur Erfassung einer Messreihe wird über die Konsole gestartet. Nach Programmstart und Initialisierung aller Komponenten wird alle 12,5 ms (entspricht einer Abtastrate von 80 Hz) ein digitaler (Kraft-)Messwert vom A/D Wandler ausgelesen und im Arbeitsspeicher abgelegt. Der Arbeitsspeicher ist für die anfallende Datenmenge mehr als ausreichend dimensioniert. Das Programm sammelt weiter in Endlosschleife Messwerte bis durch den Nutzer die Messung beendet und die bisher gespeicherten Messwerte über den Netzwerkanschluss (RJ45 Ethernet) zum PC geschickt werden. Die Auswertung der Daten erfolgt am PC in einem MATLAB-Skript, das die Umrechnung der Kraftmesswerte als Funktion der Zeit in mechanische Spannung als Funktion der Dehnung vornimmt. Die Umrechnung der digitalen Messwerte des A/D Wandler in eine Kraft in  $N$  wurde mit einem Satz von Wägestücken kalibriert.

### 3 Bestimmung von Dehnung und Zugspannung aus Motordrehung und Zugkraft

Zur Bestimmung des E-Moduls eines Materials benötigt man seine Zugspannungs-Dehnungs-Kurve, dessen Steigung der E-Modul ist. Die Dehnung des zu prüfenden Materials wird in unserem Versuchsaufbau durch Rotation der Kreisscheibe, an dessen Rand (etwas nach innen versetzt) die Materialprobe befestigt ist, verursacht. Nach einer vollständigen Umdrehung der Kreisscheibe lässt sich die Dehnung der Probe mit einer Periode eines Sinus über der Zeit beschreiben. Die Umrechnung von Motordrehung zu Probendehnung ist folgendermaßen möglich (vgl. Abb. 1):

Der Motor dreht die Kreisscheibe mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Der momentane Winkel  $\alpha$  ergibt sich zu:

$$\alpha = \omega t \quad (1)$$

wobei  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit und  $t$  die Zeit ist. Nimmt man die Motorachse als Ursprung eines Koordinatensystems an, lautet die Position des Befestigungspunkts  $P$  der Probenhalterung:

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \alpha \\ r \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (2)$$

wobei  $r$  der Abstand zwischen  $P$  und dem Mittelpunkt der Scheibe und  $\alpha$  weiterhin der momentane Winkel ist. Die aktuelle Gesamtlänge  $L$  (Länge der Probe plus die Länge der unelastischen Befestigungsfäden) als Funktion von  $P$  lautet:

$$L(x, y) = \sqrt{x^2 + (L_0 + r - y)^2}, \quad (3)$$

wobei  $L_0$  der Abstand vom Eingang der Wägezelle zur Kreisbahn der Probenhalterung (vgl. Abb. 1) ist. Nach Ersetzen der kartesischen Koordinaten  $x, y$  nach (2) erhält man die momentane Länge als Funktion des momentanen Winkels  $\alpha$ :

$$L(\alpha) = \sqrt{r^2 \sin^2 \alpha + (L_0 + r)^2 - 2(L_0 + r)r \cos \alpha + r^2 \cos^2 \alpha} \quad (4)$$

$$= \sqrt{(L_0 + r)^2 + r^2 - 2(L_0 + r)r \cos \alpha} \quad (5)$$

Ersetzt man nun  $\alpha$  in (5) durch (1) folgt schließlich die momentane Länge als Funktion der Zeit:

$$L(t) = \sqrt{(L_0 + r)^2 + r^2 - 2(L_0 + r)r \cos(\omega t)} \quad (6)$$

Aus der Länge  $L$  zum Zeitpunkt  $t$  ergibt sich die Dehnung  $\varepsilon$  durch:

$$\varepsilon(t) = \frac{L(t) - L_0}{L_{p0}} = \frac{\sqrt{(L_0 + r)^2 + r^2 - 2(L_0 + r)r \cos(\omega t)} - L_0}{L_{p0}} \quad (7)$$

wobei  $L_{p0}$  die Länge der Probe zwischen den Klemmen im ungedehnten Zustand (für  $\alpha = 0^\circ$ ) ist. Die Zugspannung  $\sigma$  ist allgemein definiert als Kraft pro Querschnittsfläche:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

wobei  $F$  die Kraft und  $A$  der aktuelle mittlere Querschnitt der Probe ist. Da Masse und Dichte der Probe bei einer Längenänderung gleich bleiben, ändert sich der mittlere Querschnitt  $A$  der Probe gemäß folgender Formel:

$$A = \frac{m}{\rho L_p} \quad (9)$$

wobei  $m$  die Masse der Probe,  $\rho$  die Dichte des Probenmaterials und  $L_p$  die momentane Länge der Probe ist. Ersetzt man nun  $A$  in (8) durch (9) und berücksichtigt, dass für die momentane Probenlänge  $L_p = L_{p0} + \Delta L$  und für den initialen Querschnitt  $A_0 = \frac{m}{\rho L_{p0}}$  gilt, erhält man:

$$\sigma = \frac{F \rho L_p}{m} = \frac{F \rho (L_{p0} + \Delta L)}{m} = \frac{F}{A_0} \left( 1 + \frac{\Delta L}{L_{p0}} \right) \quad (10)$$

Mit  $\Delta L = L(t) - L_0$  und (7) ergibt sich schließlich die Zugspannung  $\sigma$  als Funktion der Dehnung  $\varepsilon$  aus folgender Formel:

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) \quad (11)$$

Der E-Modul kann dann für einen Arbeitspunkt (Vordehnung)  $\varepsilon_0$  angegeben werden durch:

$$E = \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon = \varepsilon_0} \quad (12)$$

## 4 Untersuchte Materialien

Die Materialproben aus kommerziell erhältlichem Zwei-Komponenten-Silikonkautschuk (Fa. Trolltech) und Weichplastik (Distributor: Bleigussformen-Shop) werden als Quader mit der Grundfläche  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  und der Länge 100 mm hergestellt. Stimmlippen sind natürlich eigentlich wesentlich kürzer (etwa 1,5 cm [8]), doch um die Probe fest im Aufbau einzuspannen ist eine größere Länge von Vorteil. Aufgrund der Einspannung verringert sich die effektive Länge der Proben, auf die tatsächlich eine Kraft wirkt, auf 80 mm. Durch unterschiedliche Mischverhältnisse der Komponenten des Kautschuks werden Proben in vier unterschiedlichen Härtegraden ("superweich", "superweich-weich", "weich", "mittelhart") angemischt. Außerdem werden durch Zusatz von Silikonöl zu dem Kautschuk "superweich" in verschiedenen Mischverhältnissen vier weitere, noch weichere Proben hergestellt. Das Weichplastik in den Härtegraden "superweich" und "weich" wird mit Hartplastik versetzt, um Proben in fünf weiteren Härtegraden zu erhalten. Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung der Proben.

## 5 Messablauf

Um den E-Modul eines Probenmaterials zu ermitteln, wurde die jeweilige Probe mit unelastischen Schnüren und Klemmen fest zwischen Wägezelle und Kreisscheibe eingespannt. Die Messsoftware wurde gestartet und der Motor drehte die Kreisscheibe mit konstanter Winkelgeschwindigkeit von einer Umdrehung pro Sekunde ( $\omega = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ). Da die Frequenz der Längenänderungen der Stimmlippen während der Lautbildung kleiner als 10 Hz ist [2], wurde in den hier vorgestellten Messreihen ein Dehnungsfrequenz von 1 Hz eingesetzt. Die an der Wägezelle wirkende Kraft  $F$  wurde mit 80 Hz Abtastrate aufgenommen und gespeichert. Die Proben wurden

**Tabelle 1** - Zusammensetzung der Proben und ermittelter E-Modul an zwei verschiedenen Arbeitspunkten  $\epsilon_0$ . Aufgrund der Hysterese der Zugspannungs-Dehnungskurven ergeben sich unterschiedliche E-Module für die Dehnungs- und die Entspannungphase.

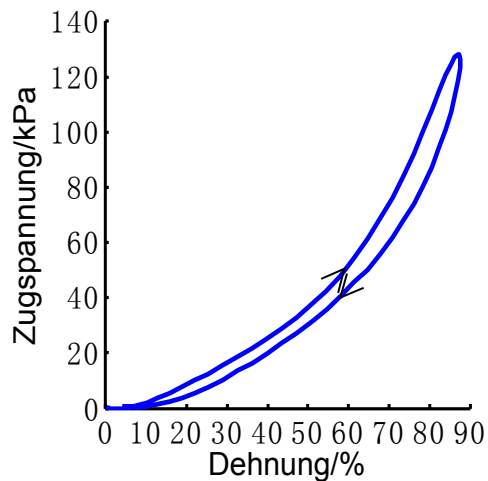
Probe	Material	Mischverhältnis	E-Modul [kPa]				
			$\epsilon_0 = 10 \%$		$\epsilon_0 = 40 \%$		
			dehnen	entspannen	dehnen	entspannen	
Sm	Silikonkautschuk	mittelhart	803,0	774,0	987,0	979,0	
Sw		weich	85,9	27,4	643,7	523,0	
Ssw		superweich-weich	258,0	139,8	227,0	281,7	
Ss		superweich	72,4	57,9	64,6	84,3	
S101		superweich-Silikonöl 10:1	49,0	6,7	47,6	49,2	
S51		superweich-Silikonöl 5:1	32,6	20,9	32,3	28,5	
S41		superweich-Silikonöl 4:1	28,2	17,3	29,2	26,4	
S31		superweich-Silikonöl 3:1	26,8	7,6	27,9	25,1	
W351		Weichplastik	weich-hart 35:1	57,0	15,0	111,5	57,6
W301			weich-hart 30:1	78,7	56,2	118,2	90,1
W251	superweich-hart 25:1		52,6	20,7	97,4	95,0	
W201	superweich-hart 20:1		64,9	19,4	87,4	65,5	
W151	superweich-hart 15:1		65,1	47,5	117,9	64,1	

in jedem Zyklus um bis zu 87,5 % gedehnt.

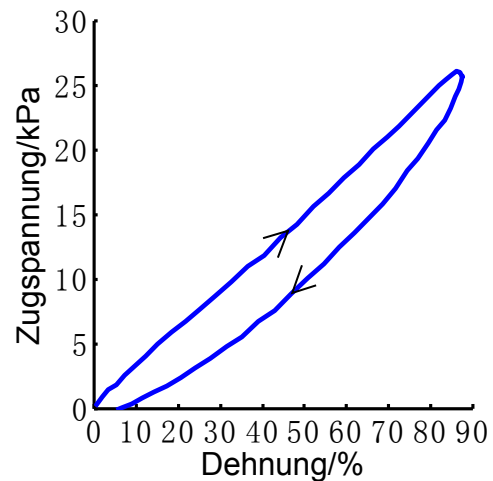
Aufgrund der Entspannungseigenschaften der Materialien verkleinert sich die Kraft in den ersten Zyklen zu Beginn einer Messreihe. Um eine reproduzierbare Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung zu gewährleisten wurden die Daten daher nach einer Stunde gesammelt und aus den Messdaten der letzten zehn Umdrehungen ein durchschnittlicher Zyklus gemittelt. Aus dieser durchschnittlichen Kraft-Zeit-Kurve jeder Probe aus Tab. 1 wurde dann die Zugspannungs-Dehnungs-Kurve gemäß Abschnitt 3 ermittelt. Anschließend wurde an den Arbeitspunkten  $\epsilon_0 = 10 \%$  und  $\epsilon_0 = 40 \%$  der jeweilige lokale E-Modul bestimmt.

## 6 Ergebnisse

Die ermittelten E-Module für die untersuchten Proben sind in den letzten vier Spalten in Tabelle 1 angegeben. Hierbei wurde an den beiden Arbeitspunkten  $\epsilon_0 = 10 \%$  und  $\epsilon_0 = 40 \%$  für die Dehnungs- und Entspannungphase getrennt der E-Modul ermittelt, da alle aufgenommenen Proben eine (unterschiedlich stark ausgeprägte) Hysterese aufwiesen. Ähnlich wie bei menschlichem Gewebe können die Kurven der Proben aus Weichplastik als Exponentialfunktion approximiert werden (vgl. Abb. 2). Jedoch besitzen menschliche Stimmlippen im Dehnungsbereich bis 15 % einen E-Modul von ca. 28 kPa (dehnen) und 18 kPa (entspannen) [1]. Selbst die ähnlichste Materialprobe aus Weichplastik W251 liegt hiervon noch weit entfernt. Die Probe S41 aus Silikonkautschuk (s. Abb. 3) dagegen besitzt in diesem Dehnungsbereich sehr ähnliche Werte (28,2 kPa bzw. 17,3 kPa). Bei natürlichen Stimmlippen steigt der E-Modul jedoch stark an und beträgt für Dehnungen über 30 % bis zu ca. 390 kPa [1], bei Probe S41 dagegen nur 29,2 kPa. Da aber bei den Schwingungen während normaler Phonation keine Dehnungen wesentlich größer als 15 % zu erwarten sind, erscheint diese Probe gut geeignet für die Herstellung künstlicher Stimmlippen.



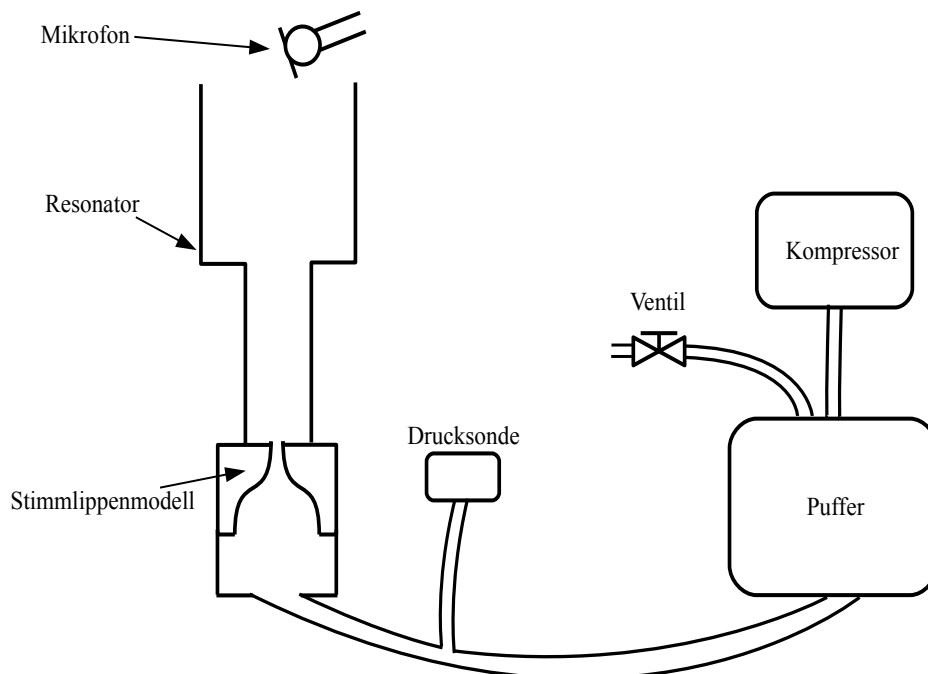
**Abbildung 2** - Zugspannungs-Dehnungs-Kurve der Probe W251.



**Abbildung 3** - Zugspannungs-Dehnungs-Kurve der Probe S41.

## 7 Ausblick

Aus dem Material der Probe S41 sollen in weiteren Arbeiten künstliche Stimmlippen nach realem Vorbild (z. B. nach [6]) aufgebaut und ihr Schwingverhalten untersucht werden. Die Gussformen sollen hierzu mittels eines 3D-Druckers aus einem Kunststoff gedruckt und dann mit dem Material der Proben S41 ausgegossen werden. Die so entstehenden künstlichen Stimmlippen könnten dann in einem Versuchsaufbau nach Abbildung 4 charakterisiert werden: Ein Kom-



**Abbildung 4** - Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Schwingverhaltens künstlicher Stimmlippen.

pressor (Typ: LA100A) erzeugt einen konstanten Luftstrom in einen Pufferspeicher. Mit einem Ventil kann der Druck im Bereich 0-5 kPa im Rohr eingestellt werden. Durch den so regelbaren subglottalen Druck, der mittels einer Drucksonde (Typ: DMU4) unterhalb der Stimmlippen im Rohr gemessen werden kann, sollen die künstlichen Stimmlippen, wie beim echten Vorbild,

zu Schwingungen angeregt werden. Supraglottal können verschiedene Resonatoren (wie bspw. verschiedene Vokaltraktformen) angeschlossen werden. Ein Mikrofon (Typ: 1/2" MM210) am Ausgang des Resonators nimmt das resultierende Schallsignal auf.

Ein weiterer, bei der Materialauswahl bisher unberücksichtigter Aspekt ist die Mehrschichtigkeit realer Stimmlippen. Zur Verbesserung der Ähnlichkeit der elastischen Eigenschaften könnte bspw. aus den untersuchten Materialien ein mehrschichtiges Modell aufgebaut und mittels des oben beschriebenen Aufbaus charakterisiert werden.

## Literatur

- [1] ALIPOUR, F. und S. VIGMOSTAD: *Measurement of vocal folds elastic properties for continuum modeling*. Journal of Voice, 26(6):816.e21–816.e29, 2012.
- [2] ALIPOUR-HAGHIGHI, F. und I. R. TITZE: *Elastic models of vocal fold tissues*. The Journal of the Acoustical Society of America, 90(3):1326–1331, 1991.
- [3] FUKUI, K., Y. ISHIKAWA, E. SHINTAKU, K. OHNO, N. SAKAKIBARA, A. TAKANISHI und M. HONDA: *Vocal cord model to control various voices for anthropomorphic talking robot*. In: *Proceedings of the 8th International Seminar on Speech Production (ISSP) 2008*, S. 341–344, Strasbourg, France, 2008.
- [4] HONDA, M.: *Pathological Voice Production by Mechanical Vocal Cord Model*. In: *Proceedings of the 9th International Seminar on Speech Production (ISSP) 2011*, S. 49–56, Montreal, Canada, 2011.
- [5] MURRAY, P. R. und S. L. THOMSON: *Synthetic, multi-layer, self-oscillating vocal fold model fabrication*. Journal of visualized experiments: JoVE, (58):3498, 2010.
- [6] SCHERER, R. C., D. SHINWARI, K. J. DE WITT, C. ZHANG, B. R. KUCINSCHI und A. A. AFJEH: *Intraglottal pressure 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] THOMSON, S. L., L. MONGEAU und S. H. FRANKEL: *Aerodynamic transfer of energy to the vocal folds*. The Journal of the Acoustical Society of America, 118(3):1689–1700, 2005.
- [8] TITZE, I. R.: *Principles of voice production*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1994.
- [9] TITZE, I. R. und D. T. TALKIN: *A theoretical study of the effects of various laryngeal configurations on the acoustics of phonation*. The Journal of the Acoustical Society of America, 66(1):60–74, 1979.
- [10] ZHANG, Z. und T. H. LUU: *Asymmetric vibration in a two-layer vocal fold model with left-right stiffness asymmetry: Experiment and simulation*. The Journal of the Acoustical Society of America, 132(3):1626–1635, 2012.