

# Bestimmung der dynamischen Materialeigenschaften von künstlichen Stimmlippen mittels optischer Messtechnik

Jürgen Ilg, Stefan J. Rupitsch, Alexander Sutor, Reinhard Lerch

Universität Erlangen, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland, Email: jilg@lse.eei.uni-erlangen.de

## Einleitung

Zur Untersuchung der menschlichen Stimmgebung verfolgen die wissenschaftlichen Arbeiten der letzten Jahre auf diesem Gebiet [1, 2] den Ansatz, die primäre Schallentstehung durch die Stimmlippenschwingung anhand von Silikon-Modellen zu analysieren. Der vorliegende Beitrag beschreibt ein Verfahren zur Materialdatenbestimmung von Silikon, die für diese Modellierung von künstlichen Stimmlippen verwendet werden. Konkret werden dabei E-Modul, Dämpfungsfaktor und Querkontraktion aus der Messung des mechanischen Übertragungsverhaltens dieser Materialien bestimmt. Hierfür wird die Unterseite einer zylindrischen Probe über einen Shaker harmonisch angeregt und die Auslenkung auf der Oberseite optisch gemessen. Durch einen Vergleich dieser Messung mit einer Finite-Elemente-Simulation werden die genannten Materialdaten des Silikons invers ermittelt und zuletzt durch Funktionen in Abhängigkeit von der Frequenz beschrieben. Der Vorteil dieser Methode begründet sich zum einen in der Möglichkeit, diese Parameter frequenzabhängig zu bestimmen, und zum anderen in dem einfachen Messaufbau.

## Silikonproben

Die untersuchten Proben werden aus den additionsvernetzenden Silikonkomponenten Ecoflex 0030<sup>®</sup> A und B und einem Verdünner<sup>®</sup> T hergestellt (Smooth-On, Inc.). Dabei werden die Komponenten A und B zu jeweils gleichen Teilen vermischt und je nach gewünschter Festigkeit Verdünner hinzu gegeben - je mehr Verdünner, desto weicher das Silikon. Die zylindrischen Proben haben einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von 10 mm und werden auf eine Aluminiumplatte geklebt, die auf einen Shaker montiert werden kann. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Untersuchung von drei verschiedenen Silikonmischungen die in Tabelle 1 zusammen mit statischen E-Moduln aufgeführt sind. Diese Werte wurden aus Zugversuchen an langen zylindrischen Proben ermittelt.

**Tabelle 1:** Statischer E-Modul mit Standardabweichungen für verschiedene Silikonmischungen; bestimmt durch Zugversuch

Mischung (A:B:T)	E-Modul in kPa
1:1:1	25.40 ± 0.5
1:1:2	13.52 ± 0.36
1:1:3	7.02 ± 0.29

## Versuchsaufbau und Messmethode

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Messaufbau. Die Silikonproben werden auf einem Shaker montiert und so auf der Unterseite harmonisch ausgelenkt. Diese Schwingung wird über einen Beschleunigungssensor erfasst. Auf der Oberfläche wird im Mittelpunkt der zylindrischen Probe die Auslenkung mittels Triangulation gemessen. Aus beiden gemessenen sinusoidalen Schwingungen werden durch Integration bzw. Differentiation die entsprechenden Geschwindigkeiten des Shakers  $v_1$  bzw. der Probenoberfläche  $v_2$  ermittelt. Somit kann das Übertragungsverhalten einer Silikonprobe mit den in Abb. 2 gezeigten Amplituden- und Phasengängen beschrieben werden.

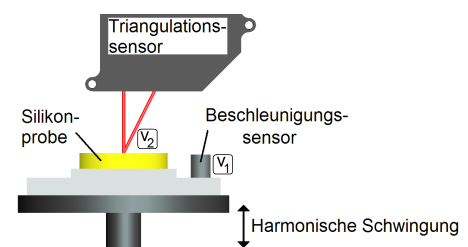


Abbildung 1: Versuchsaufbau

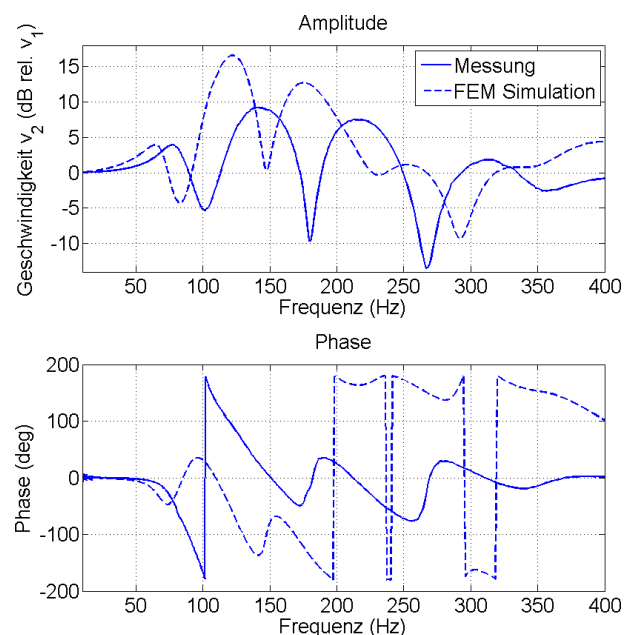


Abbildung 2: Gemessenes und mit konst. E-Modul aus Tab. 1 simuliertes Übertragungsverhalten einer Probe mit Mischungsverhältnis 1:1:2

## Simulation - Inverses Verfahren

Der zweite Schritt dieser Methode zur Materialdatenbestimmung besteht aus einer Finite-Elemente-Simulation. Dabei wird die rotationsymmetrische Silikonprobe entsprechend dem Messaufbau modelliert (Abb. 3). Auch hier wird die Geschwindigkeit im Messpunkt, bezogen auf die Anregung auf der Unterseite, betrachtet. Zuerst wurde eine Simulation mit den statischen E-Moduln aus Tabelle 1 durchgeführt. Da für gummiartiges Material die Querkontraktion bekannterweise nahe an 0,5 liegt wurde  $\nu = 0,49$  angenommen. Der Dämpfungsfaktor wurde mit  $\xi = 0,12$  manuell so angepasst, dass die simulierte Amplitudenhöhe der ersten Resonanz der gemessenen entspricht. Mit diesen statischen Werten erhält man exemplarisch für das Silikonmischungsverhältnis 1:1:2 die in Abbildung 2 gezeigte Kurve. Man erkennt, dass die Resonanzstellen der gemessenen Kurve bei wesentlich höheren Frequenzen liegen, was auf einen deutlichen Anstieg des E-Moduls bei dynamischer Belastung hinweist.

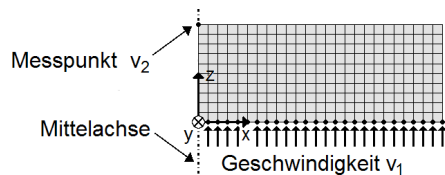


Abbildung 3: Finite-Elemente-Modell

Deshalb wurde ein inverses Verfahren [3] implementiert, das durch Variation der Materialdaten  $E$ ,  $\nu$  und  $\xi$  den quadratischen Abstand zwischen simulierter und gemessener Kurve minimiert. Dabei dienen die oben genannten statischen Werte als Startwerte. Die Anpassung der simulierten Daten an die Messwerte wird dann jeweils über einen begrenzten Frequenzbereich durchgeführt, der von den gemessenen Resonanzstellen abhängt (z.B. 0–100 Hz für die erste Resonanz in Abb. 2). Somit liefert das inverse Verfahren für jeden dieser Bereiche einen Materialdatensatz. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die ermittelten E-Modul-Werte jeweils in der Mitte der einzelnen Abschnitte. Der Wert bei 0 Hz entspricht dem statisch ermittelten E-Modul aus Tabelle 1.

## Ermittlung frequenzabhängiger Daten

Abschließend werden anhand der diskreten Materialdaten aus dem inversen Verfahren funktionale Zusammenhänge mit der Frequenz ermittelt (Abb. 4). Auch hier wird der quadratische Abstand der Funktion zu diesen Daten minimiert. Da in anderen Arbeiten [4] bereits logarithmische Zusammenhänge identifiziert wurden, werden folgende allgemeine Funktionen für den E-Modul und den Dämpfungsfaktor vorgegeben:

$$E(f) = A + B \cdot f + C \cdot \log(f + D) \quad [\text{kPa}] \quad (1)$$

$$\xi(f) = X + Y \cdot f + Z \cdot f^2 \quad (2)$$

Für jede Silikonmischung werden die Parameter A, B, C, D, X, Y und Z bestimmt.

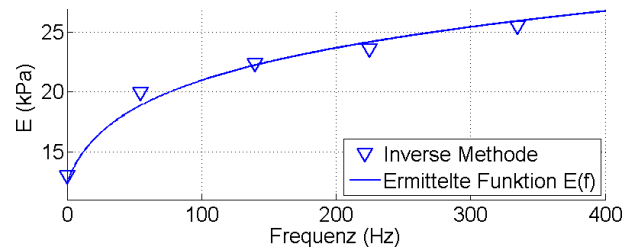


Abbildung 4: Ergebnis der inversen Methode und ermittelter E-Modul-Verlauf einer Probe mit Mischung 1:1:2

## Ergebnisse

Das Ergebnis der vorgestellten Methode ist für verschiedene Silikonmischung in Abbildung 5 dargestellt. Sowohl E-Modul  $E$ , als auch Dämpfungsfaktor  $\xi$  steigen im betrachteten Frequenzbereich erheblich an. Für die ebenfalls untersuchte Querkontraktion konnte der konstante Wert  $\nu = 0,499$  identifiziert werden.

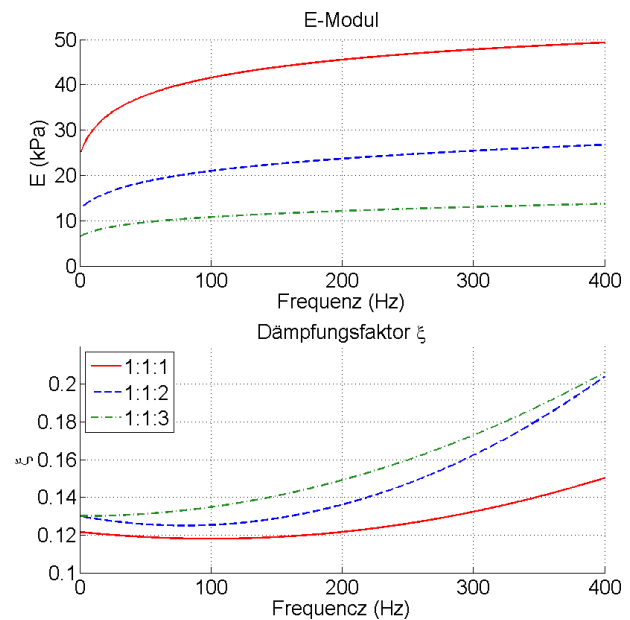


Abbildung 5: E-Modul und Dämpfungsfaktor für verschiedene Silikonmischungen

## Literatur

- [1] Becker, S. et al.: Flow-structure-acoustic interaction in human voice model. *J. Acoust. Soc. Am.* 125 (2009), 1351-1361
- [2] Pickup, B.A. and Thomson, S.L.: Influence of asymmetric stiffness on the structural and aerodynamic response of synthetic vocal fold models. *J. Biomech.* 42 (2009), 2219-2225
- [3] Rupitsch, S.J. und Lerch, R.: Inverse Method to estimate material parameters for piezoceramic disc actuators. *J. Appl. Phys. A* 97(4) (2009), 735-740
- [4] Chan, R.W. and Rodriguez, M.L.: A simple-shear rheometer for linear viscoelastic characterization of vocal fold tissues at phonatory frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 124(2) (2008), 1207-1219