

# Miniaturlaufbau zur direkten Impedanzbestimmung

Malte Kob

Klinik für Phoniatrie und Pädaudiologie  
Universitätsklinikum, RWTH, 52074 Aachen  
E-mail: mkob@ukaachen.de

## 1 Einleitung

Für die Bestimmung akustischer Impedanzen werden, je nach Messobjekt, unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Bei geeigneten Proben kann eine Messung des Schalldruckverlaufs bei Einfall einer ebenen Welle auf das Messobjekt im Kundt'schen Rohr durchgeführt werden. Neuere in-situ Verfahren, wie die Freifeld-Transferfunktionsmethode, verwenden Kugelwellen und erlauben die Impedanzbestimmung größerer Objekte. Ein bereits bekannter Ansatz für die Impedanzmessung an kleinen Objekten ist die Messung des Schalldrucks vor einer möglichst idealen Schallquelle. Bei stark resonanten Systemen mit relativ kleinen Öffnungen, wie z.B. Blasinstrumenten, sind die genannten Verfahren jedoch meist ungeeignet, weil entweder die Voraussetzung einer schnellekonstanten Schallquelle bei ausreichendem Signal-zu-Rauschabstand nicht erreicht werden kann oder eine hinreichende Ankopplung des Messobjektes an die Messapparatur nicht möglich ist.

Die hier vorgestellte Messanordnung verwendet ein Mikrofon und einen Schnellesensor ( $\mu$ -flown [1]), mit denen eine direkte Impedanzmessung, z.B. an einer Öffnung eines Musikinstruments oder dem Mund, durchgeführt werden kann. Die Impedanz des Ansatzrohrs am Mund (engl.: vocal tract impedance at the mouth, VTMI) kann als Maß für die Resonanzeigenschaften interpretiert werden, ähnlich der Vokaltraktübertragungsfunktion (engl.: vocal tract transfer function, VTTF), siehe [2]. Ein bereits existierendes Verfahren mit nur einem Sensor wurde bereits zur Charakterisierung der Ansatzrohrresonanzen und zum Aussprachetraining von Vokalen verwendet [3, 4].

## 2 Methode

Die VTMI-Methode ist eine Erweiterung der Methode von Epps *et al.* [5], bei der ein Lautsprecher an einem Ende eines Exponentialhorns angebracht ist und ein akustischer Widerstand am anderen Ende. Eine Schemaskizze des modifizierten Messaufbaus ist in Abb. 1 gezeigt. Eine detaillierte Beschreibung der Methode ist in [6] zu finden. Messungen an einem Nachbau des in [5] beschriebenen Aufbaus zeigten, dass wegen der starken Resonanzen des Ansatzrohrs die Schallschnelle am Eingang der Mundhöhle trotz des Exponentialhorns und des akustischen Widerstands nicht konstant blieb. Durch Erhöhung des Strömungswiderstandes in der Rohrmündung konnte zwar der Einfluß der externen Impedanz verringert werden, es sank jedoch zugleich der Signal-Rauschabstand. Durch Einsatz des Schnellesensors in unmittelbarer Nähe des Mikrophons können zwei Ziele erreicht werden: ein

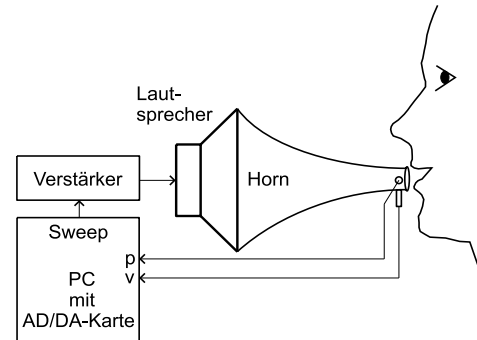


Abbildung 1: Messaufbau.

kleiner Messaufbau und die Reduzierung der Lautstärke des Anregungssignals. Der Signalfluß für beide Sensorsignale ist in Abb. 2 dargestellt. FFT bezeichnet die Four-

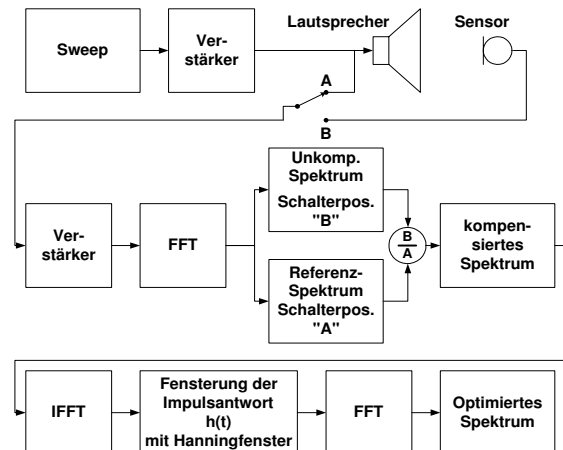


Abbildung 2: Signalfluß.

riertransformation des Zeitsignals, und IFFT steht für die inverse Fouriertransformation des Spektrums, aus der sich die Impulsantwort  $h$  des untersuchten Systems ergibt. Die akustische Punktimpedanz ist definiert als Quotient aus Schalldruck und Schallschnelle:

$$Z(f) = \frac{\text{FFT}(h_p(t))}{\text{FFT}(h_v(t))}.$$

Zur Bestimmung der Impulsantworten  $h_p(t)$  und  $h_v(t)$  kommen Sweep-Signale zum Einsatz [7]. Besonders vorteilhaft an dieser Technik ist die Möglichkeit, im Zeitbereich etwaige harmonische Verzerrungen durch Fensterung im

Zeitbereich zu minimieren. Hier wurde ein Hanningfenster (0..20 ms) verwendet. Die Impedanzen werden als Beträge dargestellt, wobei die Messung der untersuchten Impedanz auf eine Messung ohne Lastimpedanz bezogen wird. Der nutzbare Frequenzbereich wird nach unten durch die Abstrahlung des Lautsprechers und nach oben durch die Empfindlichkeit des Schnellesensors (ca. 5 kHz) begrenzt. Mit einem PC mit 800 MHz Takt können Messungen mit einem Linienabstand von 2.7 Hz bei einer Samplerate von 44.1 kHz und einer Wiederholrate von weniger als 1 Hz durchgeführt werden. Abb. 3 zeigt einen Prototyp bei der Messung.



Abbildung 3: Prototyp des Messgeräts.

### 3 Messungen

In Abb. 4 sind normierte Beträge von Schalldruck, Schallschnelle und Impedanz am Eingang eines Aluminiummodells gezeigt, das ähnliche Resonanzen aufweist wie das Ansatzrohr in Konfiguration eines Vokals. Der Verlauf der Schnelle zeigt deutliche Einbrüche bei den Resonanzen des untersuchten Systems. Entsprechend ist die Impedanz bei

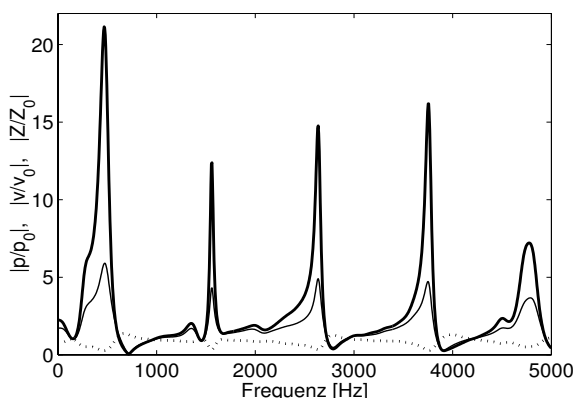


Abbildung 4: Normierte Darstellung von Schalldruck (dicke Linie), Schallschnelle (gepunktete Linie) und Impedanz (dünne Linie).

diesen Frequenzen im Vergleich zum Schalldruckverlauf deutlich erhöht.

Messungen an einem menschlichen Vokaltrakt zeigten, daß die genaue Orientierung und Positionierung der Rohrmündung (vgl. Abb. 1 und 3) kaum Einfluß auf die Analyse der Resonanzen hat, solange der Vokaltrakt hinreichend angeregt wird.

## 4 Schlußfolgerungen

Die Anwendung des VTMI-Verfahrens für die Untersuchung der Resonanzstruktur des Ansatzrohrs wurde vorgestellt. Durch Wahl des Lautsprechers lässt sich die Anordnung entweder in Richtung Mobilität oder Frequenzumfang (ca. 100 Hz bis 5 kHz) optimieren. Da die Sensoren in unmittelbarer Nähe der Schallquelle und des Messobjektes angeordnet sind, kann bei geeigneter Signalverarbeitung eine Messung in schneller Folge auch in reflektionsbehafteter Umgebung durchgeführt werden. Ein Prototyp konnte in ersten Versuchen erfolgreich zur Bestimmung der Resonanzstruktur des Ansatzrohrs von Vokal- und Obertonklängen eingesetzt werden. Der Nachweis von Formanten im Bereich zwischen 500 Hz und 5 kHz ist sowohl bei passiver Artikulation als auch während der Phonation möglich.

In zukünftigen Entwicklungen soll das Verfahren auf die Artikulationskontrolle, insbesondere hörgestörter Patienten, angewandt werden.

## Danksagung

Die Werkstätten des Instituts für Technische Akustik haben den Bau des Prototyps ermöglicht.

## Literatur

- [1] URL <http://www.microflown.com>.
- [2] Y. Pham Thi Ngoc (1995): Caractérisation acoustique du conduit vocal: Fonctions de transfert acoustiques et sources de bruit. PhD Thesis, Inst. Nat. Polytech. Grenoble.
- [3] A. Dowd, J.R. Smith and J. Wolfe (1996): Real Time, Non-Invasive Measurement of Vocal Tract Resonances: Application to Speech Training. *Acoustics Australia* **24** (2), 53-60.
- [4] A. Dowd, J.R. Smith and J. Wolfe (1997): Learning to Pronounce Vowel Sounds in a Foreign Language using Acoustic Measurements of the Vocal Tract as Feedback in Real Time. *Language and Speech* **41** (1), 1-20.
- [5] J. Epps, J.R. Smith and J. Wolfe (1997): A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during phonation. *Meas. Sci. Technol.* **8**, 1112-1121.
- [6] M. Kob (2002): Physical modeling of the singing voice. PhD Thesis, Technical University Aachen, in press.
- [7] S. Müller and P. Massarani (2001): Transfer Function Measurement with Sweeps. *J. Audio Eng. Soc.* **49** (6), 443-471.