

Messung und Simulation der Akustik des Nasaltrakts

Frank Ranostaj

Arild Lacroix

Institut für Angewandte Physik, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

Kurzfassung

Der Nasaltrakt ist ein wesentliches Element in der natürlichen Spracherzeugung: Beispiele hierfür sind die Lautklasse der Nasale (/m/, /n/, /N/) und die der Nasalvokale. Die direkte Messung der akustischen Eigenschaften des Nasaltrakts ist aufgrund der anatomischen Gegebenheiten nur schwer möglich. Es wird daher eine andere Methode gewählt, bei der Schall aus einer Quelle mit bekannter Impedanz in einem Nasenloch eingestrahlt wird und das Übertragungsverhalten anhand des am anderen Nasenloch austretenden Schalls bestimmt wird. In einem zweiten Schritt wird anhand von einer computertomographischen Untersuchung ein Volumenmodell des Nasaltrakts erstellt und für dieses die akustische Wellengleichung numerisch, mittels finiter Differenzen, gelöst. Dabei werden für das Modell die Randbedingungen der Messung gewählt. Die Ergebnisse beider Untersuchungen werden verglichen und diskutiert.

Einleitung

Beschreibt man die Entstehung von Sprachsignalen durch ein Quelle-Filter-Modell, so ändert sich bei den Lauten, bei denen die Schallabstrahlung ganz oder teilweise über die Nase erfolgt, die Filter- beziehungsweise Systemstruktur grundlegend: Während sich viele Sprachsignale, bei deren Produktion ausschließlich der Vokaltrakt beteiligt ist, durch ein rein rekursives System beschreiben lassen, sind für die Nachbildung der komplizierten akustischen Vorgänge bei Nasalen und nasalisierten Lauten Systeme erforderlich, die zusätzlich Nullstellen aufweisen. Die Parameterbestimmung derartiger Systeme aus dem Sprachsignal erweist sich trotz Fortschritten [1] als schwierig, weshalb im folgenden eine anatomische basierte Vorgehensweise gewählt wird.

Volumenmodell aus anatomischen Daten

Aus computertomographischen (CT) Daten läßt sich ein dreidimensionales Modell der Hohlräume erstellen, die den Nasaltrakt bilden. Es besteht aus kubischen Volumenelementen der Kantenlänge 0,5 mm. Für dieses Modell wird die akustische Wellengleichung

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \Delta p \quad , \quad (1)$$

dargestellt mit dem Schalldruck p und der Schallgeschwindigkeit $c = 340 \text{ms}^{-1}$, numerisch gelöst, in dem man die Wellengleichung nach der Methode der finiten Differenzen in ein System gekoppelter Differenzgleichungen überführt. Unter Verwendung der durch das Modell vorgegebenen räumlichen



Bild 1 Oberflächendarstellung des Nasaltraktvolumens. Von oben nach unten: Linke und rechte Stirnhöhle (*Sinus frontalis*), Siebbeinzellen (*Cellulae ethmoidales*), dahinter, nicht sichtbar, Keilbeinhöhle (*Sinus sphenoides*), rechter und linker Nasengang (*meatus nasi communi*), weiter außen rechte und linke Kieferhöhle (*Sinus maxillaris*), ein Teil des Rachens in den der Nasaltrakt mündet. Die weiße Fläche ist ein Frontalschnitt durch den vordersten Teil des Nasengangs.

Schrittweite h und der zeitlichen Schrittweite g ergibt sich:

$$p_{x,y,z,t+1} - 2p_{x,y,z,t} + p_{x,y,z,t-1} = K(p_{x+1,y,z,t} - 2p_{x,y,z,t} + p_{x-1,y,z,t} + p_{x,y+1,z,t} - 2p_{x,y,z,t} + p_{x,y-1,z,t} + p_{x,y,z+1,t} - 2p_{x,y,z,t} + p_{x,y,z-1,t}) \quad , \quad (2)$$

wobei $K = c^2 g^2 / h^2 = 0,3$ ein Maß des Verhältnisses zwischen räumlicher und zeitlicher Schrittweite ist.

Eine Dämpfung der Schallausbreitung findet im wesentlichen an der Oberfläche des Nasaltrakts statt [2]. Eine einfache Form der Dämpfung besteht in einer der zeitlichen Druckänderung proportionalen Kraft. In Bereich der Oberfläche erweitert sich die Wellengleichung zu [2]

$$\frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + R' \frac{\partial p}{\partial t} \right) = \Delta p \quad ,$$

wobei R' die Dämpfung charakterisiert. Entsprechend erweitert sich die Differenzgleichung (2) mit $R = R'g/2c^2$ zu

$$(1 + R)p_{x,y,z,t+1} - 2p_{x,y,z,t} + (1 - R)p_{x,y,z,t-1} = \dots$$

Die Dämpfung hat verschieden Ursachen, deren Beiträge unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten gehorchen: Betrachtet man die Schallausbreitung längs eines zylindrischen Rohrs, so ist die aus Wärmeleitung und viskoser Reibung resultierende Dämpfung proportional der Wurzel der Frequenz und umgekehrt proportional der Wurzel der Querschnittsfläche. Weitere Dämpfungen sind frequenzunabhängig und umgekehrt proportional der Querschnittsfläche oder der Wurzel der Querschnittsfläche. Für den Nasaltrakt ist die Dämpfung im Bereich kleiner Querschnittsflächen maßgeblich. Entsprechend wird der Dämpfungskoeffizient $R = 5 \cdot 10^{-4}$ gewählt, so daß die Differenzgleichungen in diesen Bereich das reale Verhalten approximiert, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Experimentelle Überprüfung

Die direkte Messung der akustischen Eigenschaften des Nasaltrakts ist aufgrund der anatomischen Gegebenheiten nur schwer möglich. Zur Prüfung des Modells wird deshalb eine äquivalente Messung durchgeführt. Bei dieser ist das Velum der Versuchsperson geschlossen und ein Schallsignal wird an einem Nasenloch eingestrahlt. Das sich ergebende Schallfeld wird an dem anderen Nasenloch aufgezeichnet und das Modell wird entsprechend angepaßt.

Für die Untersuchung wird der vordere Teil der Nase, der aus medizinischen Gründen nicht erfaßt wurde, anhand von Daten des Visual Human Projects ergänzt [4]. Damit das Modell an diese Messung adaptiert werden kann, müssen die Impedanzen von Schallquelle und Mikrofon bekannt sein; sie gehen als Randbedingung in die Differentialgleichung (1) ein. Als Mikrofon wird eine 1/2 Zoll Kondensator-Kapsel des Typs Bruel & Kjaer 4134 verwendet, deren akustische Rückwirkung für niedrige Frequenzen durch ein Äquivalenzvolumen charakterisiert werden kann [5]. Versuche mit elektrodynamischen Wandlern als Schallquelle haben sich als unpraktisch erwiesen. Zur Realisierung der Schallquelle wird deshalb eine zweite Mikrofonkapsel des genannten Typs eingesetzt. Diese wird durch einen Aktuator-Verstärker Gras 14AA angesteuert; der Verstärker erzeugt eine Signalspannung von $300V_{SS}$ und überlagert sie mit

$A/[mm^2]$	Modell	Literatur
3,00	11,0	12,3
9,25	7,2	6,6
34,25	4,2	3,3

Tabelle 1 Dämpfung eines Rohrs mit der Querschnittsfläche A verglichen mit Literaturwerten [3], in [dB/m] bei $f = 1\text{kHz}$.

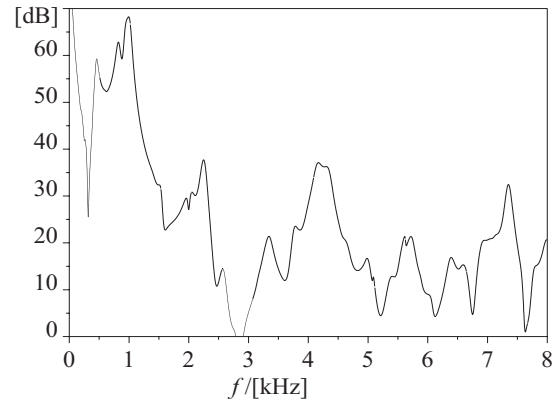
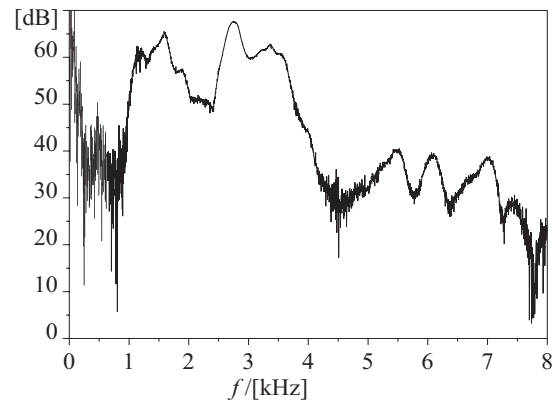


Bild 2 Gemessene (oben) und berechnete (unten) Übertragungsfunktion des Nasaltrakts.

einer Gleichspannung von 200V. An beiden Mikrofonkapseln sind konusförmige Adapter montiert, die ein akustisch dichtes Einfügen in die Nasenlöcher erlauben. Die Signalgenerierung und Messwerterfassung erfolgt durch einen PC mit einem modifizierten Linux-Kernel, welcher in Verbindung mit dem Audio-System Emu10K eine phasengenaue Bestimmung des Übertragungsverhaltens ermöglicht.

Die gemessene und die berechnete Übertragungsfunktion ist in Bild 2 dargestellt. Beide Betragsgänge weisen nur bereichsweise Übereinstimmungen auf. Es wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, die existierende Abweichungen aufzuklären.

Literatur

- [1] Liu, M., Lacroix, A.: Improved Vocal Tract Model for the Analysis of Nasal Speech Sounds; Proc. ICASSP, Atlanta(USA), 1996, vol. 2, pp. 801-804
- [2] Fasold, W., Kraak, W., Schirmer, W.: Taschenbuch Akustik; VEB Verlag Technik, Berlin 1984
- [3] Liljencrants, J.: Speech Synthesis with a Reflection-Type Line Analog, Thesis KTH Stockholm, 1985
- [4] Ranostaj, F., Lacroix, A.: Analyse der akustischen Eigenschaften des Nasaltrakts; DAGA: Berlin 1999
- [5] Bruel & Kjaer: Ba510511.pdf; www.bruelkjaer.de