

# Multimediale Darstellung von Problemen der Rohrakustik mit Hilfe des TUBEDESIGNER

Frank Ranostaj, Arild Lacroix

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

*Email: {Ranostaj,Lacroix}@iap.uni-frankfurt.de*

## Kurzfassung

Der TUBEDESIGNER ist ein System zur Präsentation und Vermittlung der Theorie und Anwendung der Rohrakustik. Die Rohrkonfiguration wird dabei durch Kreuzgliedketten-Strukturen repräsentiert. Der TUBEDESIGNER erlaubt eine interaktive Modifikation des Rohrquerschnittsverlaufs und stellt dabei die daraus resultierende Impulsantwort, die Übertragungsfunktion und den Frequenzgang dar. Zusätzlich zu der Visualisierung kann die Wirkung der Rohrkonfiguration auch auditiv beurteilt werden. Hierfür stehen eine Reihe von Anregungstypen zur Verfügung, welche Anwendungsbereiche wie Schalldämmung im Automobil, Lüftungssysteme in der Bauakustik, Blasinstrumente und insbesondere Sprachproduktionsmodelle abdecken. Für letztere ist durch eine automatische Parameterbestimmung aus gesprochener Sprache eine instantane Visualisierung des sich durch die Artikulation ergebenden Querschnittsverlaufs möglich.

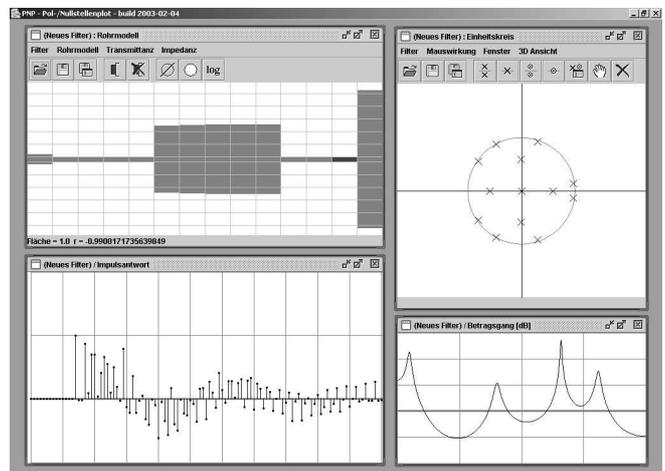
## Einleitung

Die Ausbreitung ebener Schallwellen in Rohrsystemen ist in vielen Bereichen der Akustik von Interesse und ermöglicht in zahlreichen Anwendungsfällen eine hinreichend genaue Beschreibung des akustischen Verhaltens: Dieses wird hierbei beeinflusst durch Impedanzänderungen entlang der Wellenausbreitung und durch die Topologie des Systems, es wird geprägt durch die daraus entstehenden Resonanzen und Interferenzen.

Der TUBEDESIGNER greift die Elemente der Rohrakustik auf, indem er zeitdiskrete Äquivalente von Impedanzverläufen und, zur Nachbildung der Topologie, Verzweigungen zur Verfügung stellt. Die Impedanzverläufe resultieren aus Änderungen des Rohrquerschnitts und werden zeitdiskret durch Kreuzgliedketten nachgebildet. Ein Kreuzglied repräsentiert dabei einen Querschnittssprung kombiniert mit einem homogenen Rohrsegment [1].

Diese Elemente lassen sich in nahezu beliebigen Konfigurationen zusammensetzen, und erlauben es zusammen mit unterschiedlichen Anregungsmöglichkeiten verschiedene Aspekte ihrer Akustik zu betrachten. Die zeitdiskreten Elemente besitzen gegenüber zeitkontinuierlichen Realisierungen den Vorteil auch zeitvariante Prozesse erfassen zu können. Sie sind somit Vorbedingung zur Integration von Signalquellen auf die das akustische System rückwirken kann. Kontinuierliche Querschnittsänderungen eines Rohrsystems werden durch äquidistante Querschnittsprünge approximiert.

Zu den systemtheoretischen Bezügen kommt ein weiterer Schwerpunkt hinsichtlich einer intuitiven Bedienbarkeit des TUBEDESIGNERS. Diese soll den Interessierten die Ein- und Ausgabemedien sowie die Analysemethoden unmittelbar erschließen.



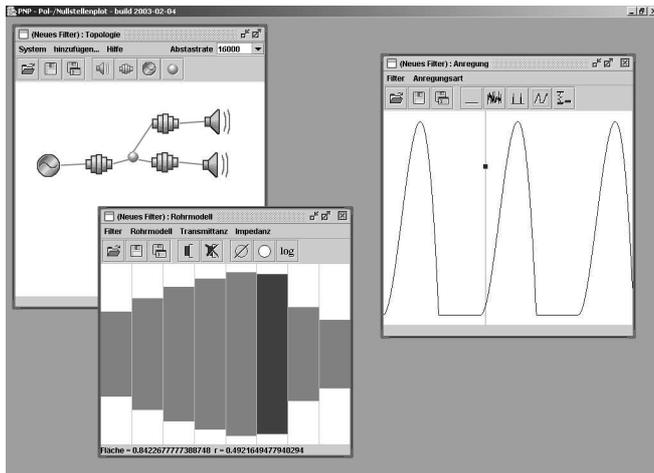
**Abbildung 1** Analyse der Akustik eines Eintopfschalldämmers eines Verbrennungsmotors. Der Querschnittsverlauf, oben links, ist logarithmiert und mit einer großen abschließenden Querschnittfläche versehen, die die Schallabstrahlung in einen Raum in guter Näherung erfäßt. Darunter ist die Impulsantwort des Schalldämmers dargestellt, rechts daneben der Betragsgang der Übertragungsfunktion. Rechts oben sind die Pole der Übertragungsfunktion in der  $z$ -Ebene abgebildet.

## Anwendungen

Der TUBEDESIGNER eignet sich zur Beschreibung und Darstellung von einer Reihe von Problemen der Rohrakustik, wie die folgenden Beispiele verdeutlichen:

Ein Anwendungsgebiet, in dem die Rohrakustik erfolgreich eingesetzt wird, ist die Untersuchung von Schalldämmern wie sie im Automobil verwendet werden. Abbildung 1 zeigt ein einfaches Beispiel; komplexere Realisierungen sind in [2] behandelt, wo insbesondere auch gezeigt wird, mit welcher hoher Genauigkeit die Modellaussagen zutreffen. Weitere Anwendungsgebiete liegen in der Untersuchung von Blasinstrumenten oder in der Bauakustik, beispielsweise wenn man Schalleigenschaften von Lüftungs- und Klimaanlageanlagen betrachtet. Bei diesem Beispiel steht die Geräuschbeeinflussung durch die Topologie des Lüftungsbeziehungsweise Rohrsystems im Vordergrund.

Unser primäres Interesse liegt in der Beschreibung der Sprachproduktion. Abbildung 2 zeigt ein einfaches Modell, mit dem sich auch nasalierte Laute erzeugen lassen. Detaillierte Nachbildungen des Nasaltrakts mittels Rohrmodellen finden sich in [4]. Für die Sprachproduktion sind weitere Anregungsformen vorgesehen, Beispielsweise ist es möglich, Spektren für unterschiedliche Parameter des Oliveira-Modells darzustellen. Mit einer automatischen Parameterbestimmung des Rohrmodells wird für gesprochene Sprache eine instantane Visualisierung des sich durch die Artikulation ergebenden Querschnittsverlaufs möglich.

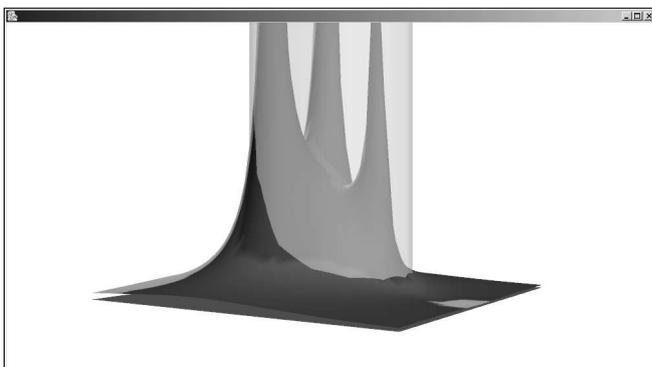


**Abbildung 2** Systemtopologie zur Wiedergabe nasaliertes Sprachlaute: Die Signalquelle (rund) wird in dem Fenster oben rechts bezüglich Grundfrequenz und „Öffnungsverhältnis“ parametrisiert, die Signalform entspricht [5]. Daran angeschlossen sind drei Rohrsysteme, die die Schallausbreitung im Rachen, Vokaltrakt und (stark vereinfacht) im Nasaltrakt beschreiben. Der Vokaltrakt wird im Querschnitt in mittleren Fenster wiedergegeben. Gekoppelt sind diese drei Rohrsysteme über ein Dreitoradaptor, schematisiert durch einen Knotenpunkt, der die Funktion des Velums nachbildet. Die Schallabstrahlung, die sowohl über den Mund als auch die Nase erfolgt, wird durch die beiden Lautsprecher symbolisiert.

Zusätzlich zu den in Abbildung 1 und 2 gezeigten Darstellungen ist es möglich auch die Übertragungsfunktion zu berechnen, Abbildung 3 zeigt dafür ein Beispiel.

## Realisierung

Eine Vorversion, welche im Rahmen von [1] demonstriert wurde, hat gezeigt, daß eine Implementierung in C++ selbst unter Verwendung sogenannter Rapid-Application-Development Systemen eine Reihe von Nachteilen besitzt. Eine Implementierung in Java erweist sich als vorteilhafter: Die Einarbeitungszeit in die Programmiersprache und daraus mittelbar folgend in das Programm ist geringer, da viele Konstrukte der Programmiersprache und der Bibliotheken vereinfacht sind. Der Einstieg wird weiterhin erleichtert durch die



**Abbildung 3** Dreidimensionale Darstellung des Betrags einer Übertragungsfunktion. Rechts eine reelle Nullstelle, die mit einem Pol einen Allpaß bildet, links ein Polpaar. Der transparente Zylinder visualisiert die Lage des Einheitskreises; sein Schnitt mit dem Funktionsfläche zeigt den Betrag des Frequenzgangs.

Verfügbarkeit kostenloser Entwicklungsumgebungen.

Die im Vergleich zu C++ deutlich geringere Ausführungsgeschwindigkeit ist in dieser Applikation nicht relevant, da selbst die rechenintensive Synthese des Audiosignals auf älteren PCs in Echtzeit möglich und interaktiv steuerbar ist. Mitentscheidend hingegen ist jedoch die Möglichkeit, ohne langwierige Installationen die Applikation via Internet verfügbar zu machen; sie läßt sich direkt von der Homepage unsere Arbeitsgruppe starten.

Als praktisch hat sich weiterhin die Sound-Schnittstelle von Java erwiesen; sie erlaubt die Auswahl beliebiger Abtastraten  $f_s$  und führt hierfür eine Ratenkonvertierung zu den üblichen vorgegebenen Abtastraten der Hardware durch. Dies erlaubt eine dem untersuchten Objekt angepaßte Auswahl der Rohrsegmentlänge  $l_0 = \frac{c}{2f_s}$ , wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit symbolisiert.

## Ausblick

Der Anstoß zur Entwicklung des TUBEDESIGNER war die Ablösung eines DSP-basierten Systems, welches in Vorlesungen Anwendungsbeispiele aus der Signalverarbeitung illustriert; in [3] ist eine darauf basierende Anwendung zur Demonstration des Sprachproduktionsprozesses vorgestellt. Neben bereits implementierten grundlegenden Analysemöglichkeiten sind deshalb entsprechende Erweiterungen mit verschiedenen (virtuellen) Instrumenten vorgesehen, wie Oszilloskop und Spektrograph. Auch die Eingabe und Darstellung der Impulsantwort von FIR-Filtern, die das Komplement zu rein rekursiven Kreuzgliedkettenfiltern bilden, geht in diese Richtung. Die Anwendbarkeit in der Akustik soll mit weiteren Anregungstypen erweitert werden, insbesondere mechanische Modelle der Stimmlippen für die Phonation sowie vergleichbare Modelle der Tonerzeugung in Musikinstrumenten sind vorgesehen.

Ziel ist es, mit den genannten Strukturen eine offene Architektur zu schaffen, die Anwendern ein einfaches Erweitern um gewünschte Funktionen ermöglicht.

Die Autoren danken Herrn Dr. R. T. Pietsch für die Bereitstellung des Programms PNP [6], dessen Weiterentwicklung zu der Java-Version des TUBEDESIGNER geführt hat.

## Literatur

- [1] Lacroix, A.: Spracherzeugung — Akustik, Modelle und Anwendungen. Tagungsband DAGA, Bochum 2002.
- [2] Schönbach, B.: Schallausbreitung in gekoppelten Rohrsystemen, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7 Nr. 176. VDI-Verlag, Düsseldorf 1990.
- [3] Eichler, M., Lacroix, A.: Ein Experimentalsystem zur Sprachsynthese mit einem zeitdiskreten Rohrmodell, Tagungsband DAGA, 508-509, Bonn 1996.
- [4] Ranostaj, F., Schnell, K., Lacroix, A.: Modellierung des Nasaltrakts, Tagungsband Elektronische Sprachsignalverarbeitung, 58-63, Görlitz 1999.
- [5] Oliveira, L. C. Estimation of Source Parameters by Frequency Analysis, Proc. Eurospeech, 99-102, Berlin 1993.
- [6] Pietsch, R. T.: <http://pnp.sourceforge.org>