

# Eindimensionale Modellierung der Schallausbreitung in Kanalsystemen basierend auf dreidimensionaler Schallfeldsimulation

Christoph Reichl<sup>1</sup>, Matthias Haigis<sup>1</sup>, Hermann Lang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *arsenal research - Austrian Research Centers, A-1210 Wien, Email: christoph.reichl@arsenal.ac.at*

## Einleitung

Schallausbreitung in Kanalsystemen ist eine in der Klimatechnik permanent auftretende Herausforderung. Lüftungsventilatoren, Generatoren und Klimaaggregate sind einerseits selbst Schallquelle, andererseits regen sie die angeschlossene Struktur zu Vibrationen an. Die Arbeit fokussiert auf der Schallausbreitung der Schallfelder von Aggregaten durch Kanalsysteme - induzierte Schwingungen der Luftsäule sowie Vibrationen der Kanalwände werden vorerst nicht betrachtet.

Neben der Simulation der Ausbreitung der Schallquellen der Klimaaggregate kommt auch die mathematische Beschreibung der (durch das Strömungsfeld an Bögen, Verteilern, Diffusoren induzierten) aeroakustischen Quellen hinzu. Auch die Ausbreitung der Schallfelder über die Kanalsysteme über die Öffnungen (z.B. Diffusoren) in den Innenraum (Innenraumkorrektur) ist relevant.

## Eindimensionale Modellierung

Für die Auslegung von Kanalsystemen z.B. in Gebäuden oder Reisezugwaggon ist die Akustik jedoch keinesfalls der alleine maßgebliche Parameter. Vielmehr ist ein ganzheitlicher Ansatz zu verfolgen, der Druckverlust, auftretende Strömungsgeschwindigkeiten im Innenraum, thermische Größen, Gewicht und Stabilität mitberücksichtigt. Letztendlich können auch Aussagen über die Ausbreitung von Partikeln und Kondensationseffekte für den Entwickler wesentlich sein.

Während das Verhalten der Schallfelder in einfachen Anordnungen analytisch bekannt ist, sind die Effekte komplizierterer Geometrien nur messtechnisch oder mittels dreidimensionaler akustischer Simulation (BEM, FEM) zugänglich (siehe Abb. 1). Ähnlich ist die Situation bei der Realisierung von schalldämpfenden Belägen gelagert - hier ist für die dreidimensionale numerische Simulation ein aufwendiger frequenzabhängiger Parametersatz erforderlich.

In der Frühphase des Designs eines Klimatisierungssystems stehen aber Geschwindigkeit der Modellierung, eine möglichst einfache Erstellung der Modelle sowie die Möglichkeit zur Optimierung einiger wesentlicher Parameter im Vordergrund. In vielen Fällen werden Messungen oder dreidimensionale Simulationen in dieser Phase nicht möglich oder zu aufwendig sein.

Ziel der Arbeiten ist es, ein eindimensionales Modell einer Klimatisierung (z.B. in einem Reisezugwaggon) um die Physik der Akustik zu erweitern. Im 1D-Fall kann die Berechnung der am Beobachter eintreffenden Schallleistungspegel bzw. -spektren extrem rasch erfolgen. Die akustischen Komponenten können daher auch in einen modernen Optimieralgorithmus zusammen mit den anderen

Bestimmungsgrößen integriert werden. Gleichzeitig sind aber Einbußen in der Genauigkeit nicht zu vermeiden.

## Kopplung von Druckverlusten, lokalen Geschwindigkeiten und Schallpegel

Stellt man an die Wurzel des Kanalsystems die eigentliche Klimaanlage als Schallquelle im Oktavband, so verändern sich die Schallpegel [1,2] im Laufe ihres Weges in den Innenraum des Fahrzeugs aufgrund verschiedener Effekte:

(1) Pegel werden durch Kanäle (welche eine akustische Außenisolierung sowie innere Absorbitionsschichten haben können) in den verschiedenen Oktavbändern geometrieabhängig gedämpft.

(2) Solch eine dämpfende Wirkung haben auch Bögen, welche jedoch ähnlich zu Verteilern auch neuen Schall erzeugen. Der neu erzeugte Pegel variiert frequenzabhängig als Funktion der geometrischen Verhältnisse (Kanalabmessungen, Rundungen), der lokalen Strömungsgeschwindigkeit, dem charakteristischen Spektrum und der Strouhalzahl, die beide aus der Mittenfrequenz des Oktavbands sowie dem hydraulischen Durchmesser und der lokalen Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden können. Liegt der Bogen bereits in einem Gebiet mit turbulenter Strömung, ist der zu erwartende Pegel höher (dieser Effekt kann als polynomische Funktion des Geschwindigkeitsquotienten aus Ein- zu Austrittsgeschwindigkeit beschrieben werden).

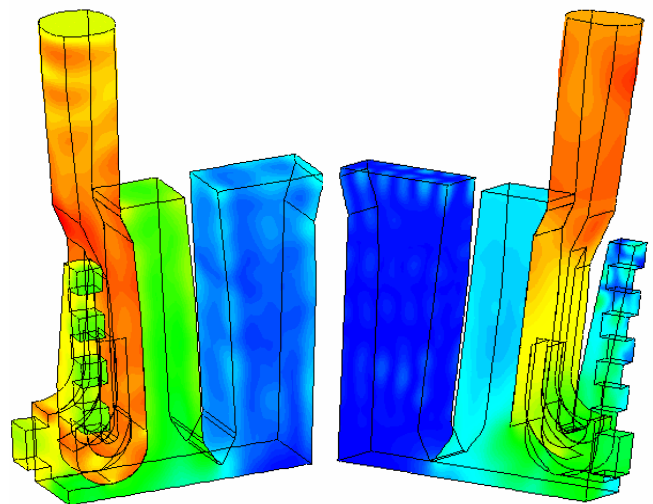


Abbildung 1: Dreidimensionale Akustiksimulation (FEM) für die Generierung von Modellen und Parametern

(3) Verteiler verhalten sich prinzipiell in ihrer schallerzeugenden Wirkung ähnlich zu Bögen, es kommt jedoch die Aufteilung der Schallpegel auf die beiden Ausgänge (z.B. als Funktion der Flächenverhältnisse) hinzu. Können sich ebene Wellen in Eintrittskanal des Verteilers bei der betrachteten Frequenz ausbreiten, so führt dies zu

einer zusätzlichen Dämpfung der Schallwellen in den Austrittskanälen aufgrund dieser reflektierten Welle.

(4) Auch die bei den Auslässen des Klimasystems in die Innenräume typischen Diffusoren erzeugen lokal Schall, der von der Querschnittsfläche, der Geschwindigkeit in der Zuströmung und dem Druckverlust des Diffusors abhängt.

Da einige Komponenten von Klimaanlage lokal den Schallpegel als Funktion von Druckverlust und Geschwindigkeit erhöhen, ist die gekoppelte Lösung der Gleichungen für Schall, Druck und Geschwindigkeit sehr vorteilhaft.

### Numerisches Modelica Modell

Die bestehenden Komponenten eines Modelica [3] - Modells der Klimatisierung eines typischen Reisezugwaggons (Geschwindigkeits- und Druckverlustmodell der Klimatisierung) wurden um die physikalischen Eigenschaften der Schallausbreitung erweitert. Neben dem Totaldruck (als Potentialgröße) und dem Volumenstrom (als Flussgröße) wurden die Schallpegel für jede Mittenfrequenz der Oktavbänder (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz) als neue Potentiale definiert.

Unterschiede in der Modellierung von fluiddynamischen und akustischen Größen ergeben sich in erster Linie durch die Tatsache, dass sich Schall auch in Gegenrichtung zur vorherrschenden Strömungsrichtung ausbreiten kann. Außerdem kommt neben der normalen linearen Pegelsubtraktion noch die logarithmische Addition von zusätzlichen Quellen (Diffusoren, Bögen, Verteiler) hinzu, die sich auf die Komplexität der Kopplung der Elemente über die Konnektoren auswirkt.

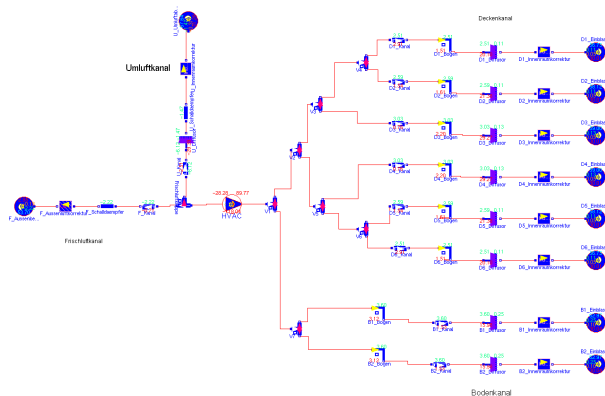


Abbildung 2: Modelica-Modell eines typischen Reisezugwaggons. Fluidynamische und akustische Größen werden im 1D-Modell gekoppelt simuliert.

### Innenraum- und Aussenraumkorrekturen

Das Modell endet zunächst an den Öffnungen der Kanäle (evtl. über Diffusoren) zum Innen- bzw. Aussenraum. Obwohl bereits diese Information wichtige Hinweise für das Design und die Auslegung der Klimaanlage gibt, sind summierte Pegel an der Beobachterposition im Innenraum ebenfalls bedeutend. Mit einer Innenraumkorrektur wird der Pegel einer Schallquelle in Abhängigkeit von Volumen und Oberfläche des Innenraums, dem mittleren

frequenzbandabhängigen Absorptionskoeffizienten (akustischer Charakter des Raumes) und der Nachhallzeit für eine Beobachterposition in einem bestimmten Abstand von der Quelle berechnet. Die Oktavbandspektren auf dieser Beobachterposition können summiert werden (siehe Abb. 3) und bei Variation des Beobachters eine Schallpegellandkarte des Innenraums generiert werden.

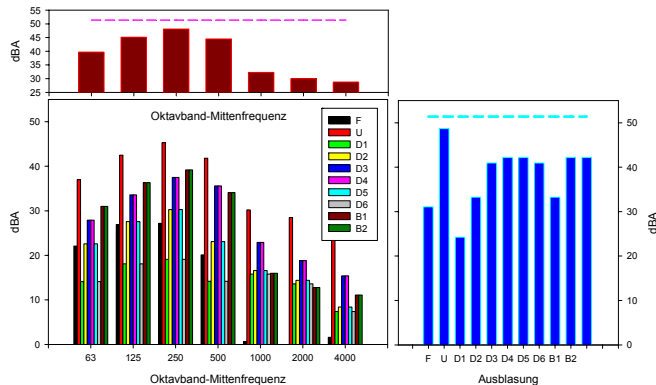


Abbildung 3: Oktavbandspektren des Signals, das einen Beobachter im Inneren des Zuges (4 m Abstand) von den verschiedenen Kanalauslässen erreicht. Das obere Spektrum summiert über alle Signale, das rechte über alle Bänder. Die Schallquelle an der Wurzel des Kanalsystems wurde in der Simulation auf 70dBA gesetzt.

Ebenso ist es möglich, die Pegel von im Freien liegenden Schallquellen mit einer Außenraumkorrektur für verschiedene Beobachterpositionen zu berechnen, wobei sowohl reflektierende Oberflächen als auch Barrieren mathematisch berücksichtigt werden können.

### Zusammenfassung & Ausblick

Die Arbeit gibt einen Überblick über die laufenden Arbeiten zur Integration und Modellierung gängiger Kanalkomponenten in Modelica. Die Kopplung fluid-dynamischer und akustischer Größen wurde anhand eines Innenraummodells eines Reisezugwaggons demonstriert. Eine große Bedeutung kommt den Parametern und Modellen für die einzelnen Komponenten zu, die sowohl messtechnisch, analytisch als auch durch dreidimensionale akustische Simulation gewonnen werden können.

### Literatur

[1] Reynolds, D. D, Bledsoe, J. M., Algorithms of HVAC Acoustics, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Inc., ISBN 0-910110-75-1, 1991

[2] Lips W., Strömungakustik in Theorie und Praxis, 3. Aufl., ISBN 3-8169-2021-7, expert verlag, 2001

[3] Fritzon P., Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1, ISBN 0-471-47163-1, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004