

Technische Universität Berlin  
Fakultät I  
Institut für Sprache und Kommunikation  
Fachgebiet Audiokommunikation

# Sound Design of Modal Synthesis Models

**Exposé zur Masterarbeit**

13.04.2013

Pascal Kaap  
Matrikelnummer: 310017  
Pascal.Kaap@gmx.de

## **Zusammenfassung**

Die geplante Masterarbeit befasst sich mit der Klangsynthese auf Grundlage physikalischer Eigenschaften von Musikinstrumenten, der sogenannten „Physikalischen Modellierung“. Der Fokus der Modellgenerierung liegt auf der Modalsynthese der zu untersuchenden Objekte. Bisher war die Modellierung auf Grund der Rechnerleistung von Endverbrauchergeräten sehr beschränkt, so dass notwendige Modellvereinfachungen unumgänglich waren, was sich meist negativ auf den Klang auswirkte. Die immer weiter steigenden Rechenkapazitäten lassen exaktere Modellierungen und im Ergebnis komplexere Klangkonstruktionen zu.

Der Hauptbestandteil der Arbeit besteht in der Programmierung von Klanganalyseskripten und der Implementierung physikalischer Modelle Soundsynthese Software „Synth-A-Modeler“. Ziel ist es, mit Hilfe der angefertigten Analyseskripten neue physikalische Modellsimulationen sowie bereits vorhandene Modelle zu kalibrieren. Grundlage der Kalibrierung bilden in erster Linie Klangbeispiele von realen Musikinstrumenten. Es ist aber auch denkbar die Kalibrierung anhand von frei ausgedachten Modellparametern vorzunehmen. Als Resultat sollen daraus „wohlklingende“ Modelle entstehen. Optional kann anschließend eine kleine Musikkomposition erarbeitet werden. Die Arbeit ist beschränkt auf die Simulation der Bewegungsgesetze der modellierten Objekte. Die Simulation der Abstrahlung ist kein Bestandteil dieser Arbeit.

# 1 Einleitung

Die Beschreibung physikalischer Vorgänge von Klängen beziehungsweise von Musik und deren Entstehung ist seit je her ein wichtiges und weit verbreitetes Forschungsthema. Bereits die Griechen, insbesondere Euklid und Archytas, versuchten die Eigenschaften der Musik physikalisch-mathematisch zu beschreiben, hierbei wurde zum Beispiel der Frage nach dem Ursprung des Klanges und der mathematischen Beschreibung von Harmonie nachgegangen. Eine umfassende Abhandlung der jüngeren Geschichte über die Physik der Schallentstehung und des Klanges stammt von Rayleigh [1]. So scheint es naheliegend, die Synthese von Klängen auf Grundlage der physikalischen Vorgänge in einem Musikinstrument zu realisieren. Die Beschreibung der physikalischen Gesetze dient außerdem auch dem Verständnis der untersuchten Instrumente und kann helfen, Bauweisen auf Grundlage der physikalischen Eigenschaften zu verändern. Die Simulation von Parametermodifikationen, wie es zum Beispiel in der Automobilindustrie üblich ist, kann den Entwicklungsprozess beschleunigen und vergünstigen.

Gegenüber klassischen Syntheseformen wie zum Beispiel der FM- oder der additiven Synthese hat die Physikalische Modellierung den entscheidenden Vorteil, das die Klangmodellierung direkt mit Hilfe physikalischer Parameter, wie zum Beispiel der Länge einer Saite oder den Durchmesser einer Membran erfolgen kann. Einer der Hauptnachteile besteht in dem großen Rechenaufwand. Die Physikalische Modellierung kann im wesentlichen durch folgende Synthesemethoden realisiert werden: Die hier verwendete Modalsynthese, die rein numerische Lösung der partiellen Differentialgleichungen, die Beschreibung der physikalischen Bauteile als digitale Filter und die Beschreibung durch Masse-Feder-Netzwerke. Für einfache Objekte wie zum Beispiel die Saiten einer Gitarre, eignet sich auch die Wellenleitersynthese.

Die Kombination verschiedener Methoden ist oft von Vorteil. Die Modalsynthese bietet sich besonders bei Strukturen mit einer komplexen Geometrie an. In Verbindung mit der Beschreibung durch Masse-Feder-Netzwerke können auch zusammengesetzte Bauteile gut beschrieben werden. Die Simulation umfasst im Wesentlichen drei physikalische Vorgänge: Die Anregung von Körperschall in einem Objekt, die Bewegungen des Objekts und schließlich die Abstrahlung, also die Umwandlung von Körperschall in Luftschall, wobei letzteres in dieser Arbeit nicht behandelt wird. Um Klänge von hoher Güte zu erhalten, müssen modale Modelle ausgearbeitet werden, welche die relevanten Kernkomponenten der komplexen physikalischen Vorgänge möglichst genau abbilden. Grundlage der Modellierung ist die sinnvolle Parametrisierung des Modells. Um diese Simulationen durchführen zu können, ist es meist unzureichend, die in der Regel nicht linearen physikalischen Vorgänge auf lineare Problemstellungen zu reduzieren. Andererseits soll dem Endnutzer (Musiker) sowohl eine Echtzeitsimulation, als auch eine intuitive Klanggestaltung ermöglicht werden. Dies führt zu zwei der Hauptproblematiken der PM-Synthese: Die Echtzeitsimulation komplexer physikalischer Vorgänge und die intuitive Klangmodellierung.

## Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit sollen Skripte geschrieben werden, welche es dem Endnutzer ermöglichen, eigene Klangmodelle auf der Basis von Klangbeispielen zu erschaffen und diese intuitiv zu modifizieren. Dazu werden im ersten Arbeitsschritt lineare modale Modelle implementiert und anschließend auf deren Basis Kalibrierskripte erstellt, welche es ermöglichen diese Modelle auf der Grundlage von Klangbeispielen zu kalibrieren. Die Analyse entspricht im wesentlichen einer Modalanalyse, in der Resonanzfrequenzen ermittelt und deren Spektraler bzw. zeitlicher Verlauf analysiert wird. Hieraus werden Koeffizienten wie Dämpfung und Amplitude ermittelt.

Dies beinhaltet zu Anfang die grafische und parametrische Analyse der Klangbeispiele. Hierbei soll dem Nutzer durch eine grafische Oberfläche die Möglichkeit gegeben werden, jederzeit in den Analyse- und Modellierprozess einzugreifen. Die sinnvolle Parametrisierung ist hier von zentraler Bedeutung. Ziel ist es Modelle zu erstellen, die mit möglichst wenigen Parametern einen reichen und wohlklingenden Klang erzeugen. Im Rahmen dieser der Arbeit werden 100 Modelle erstellt und kalibriert. Diese können sowohl Simulationen real existierender Instrumente als auch neugestaltete künstliche Klänge sein. Im Anschluss werden die Modelle um nichtlineare Problematiken ergänzt und, falls realisierbar, wird auch die Analyse- und Modellierprozess die Möglichkeit haben, gewünschte Modellparameter anzupassen. Einige physikalische Modellsimulationen und verschiedene Klangbeispiele werden dabei bereitgestellt und vom Verfasser ergänzt. Ein weiterer Arbeitsschritt beinhaltet, um den Rechenaufwand zu minimieren, das automatische Stutzen von Moden schon im Analyseprozess, welche für den simulierten Klang aus psychoakustischer Sicht keine wesentliche Rolle spielen. Mit den so erstellten Klangmodellen kann optional im finalen Arbeitsschritt eine Komposition arrangiert werden.

## **2 Stand der Forschung**

Die Physikalische Modellierung im Bereich der Akustik entstand mit dem Aufkommen des digitalen Zeitalters. Als einer Pioniere kann Julius O. Smith genannt werden, der insbesondere im Bereich der physikalischen- Signalanalyse und Verarbeitung bedeutende Vorarbeiten geleistet hat. Außerdem ist er einer der Begründer der Wellenleitersynthese. Die Modalsynthese hat ihren Ursprung in der Untersuchung von komplexen schwingungsfähigen Mehrteilsystemen im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus [2] [3]. Später fand sie den Weg in die Akustik. Für die in dieser Arbeit verwendeten Modalsynthese zur Klangerzeugung, wird der Klang über die modalen Eigenschaften eines Objektes definiert. Diese setzen sich im wesentlich aus der Frequenz der Mode, der über die Dämpfung definierten Abklingzeit und der Amplitude zusammen. Um die Realisierbarkeit zu garantieren, muss bei dieser Methode eine sinnvolle und möglichst einfache Parametrisierung des Modells, insbesondere in der nichtlinearen Modellierung, umgesetzt werden. In dieser Arbeit soll die Parametrisierung mit Hilfe der Analyse von Klangbeispielen erfolgen. Vorangegangene Forschungen versuchten zum Beispiel eine automatische analytische Parametrisierung des Modells über die geometrischen Informationen und Materialeigenschaften dreidimensionaler Objekte [4]. Andere untersuchten die Möglichkeit, modale Eigenschaften mit Hilfe von komplett frei gestalteten Objekten zu ermitteln [5]. Hauptproblem bestand darin, dass dem Anwender keine Möglichkeit der intuitiven Klanggestaltung gegeben wurde. Außerdem führten manche Ansätze zu einer falschen Vereinfachung und Parametrisierung des Modells, welches sich negativ auf den erzeugten Klang auswirkte. Daher wird in dieser Masterarbeit der Realisierbarkeit der Resynthese über die modalen Eigenschaften aufgenommenen Instrumente untersucht.

## **3 Methoden und Quellen**

### **Methoden**

Die Masterarbeit umfasst im wesentlichen drei Methoden. Vorrangend die Literaturrecherche, um die während des Studiums gewonnen Kenntnisse zu vertiefen und neue Kenntnisse insbe-

sondere auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung zu erlangen. Anschließend die Programmierung verschiedener physikalischer Modellsimulationen und die Erstellung passender, auf der Analyse von Klangbeispielen basierende, Kalibrierskripte. Auch wenn die finale Vertonung der Modelle mit der Opensource Software SYNTH-A-MODELER umgesetzt wird, findet der Hauptteil der Programmierung in MATLAB statt. Auf der Modellierung und Kalibrierung folgt eine empirische hörakustische Methode zu Erstellung von verschiedenen Klangbeispielen, welche optional durch eine kleine Testreihe mit einigen Probanden erweitert werden kann, um die Klangqualität einschätzen zu können. Im Anschluss der Modellierung und Kalibrierung besteht der finale Part in der Komposition eines Musikstückes, welches einige der vorher erstellten Klangmodelle beinhaltet. Die Art der Komposition ist dem Verfasser überlassen. Denkbar ist zum Beispiel eine Klangcollage.

## Quellen

Für die Implementierung der oben genannten Modellsimulationen sowie der Kalibrierskripte sind Kenntnisse aus der Newtonschen Mechanik, der angewandten Numerik und der digitalen Signalverarbeitung notwendig. Die hierfür notwendige Literatur wurde teilweise im Vorfeld bereitgestellt und im Laufe der Arbeit vom Verfasser durch ihm passend erscheinende Werke ergänzt. Die wohl umfassendste Beschreibung physikalischer Vorgänge von Musikinstrumenten liefert das Buch „The Physics of Musical Instruments“ [6]. Diese Literatur kann während des gesamten Arbeitsprozesses als Orientierung für die Analyse und Kalibrierung dienen. Die Bewegungsgesetze von Schalen- und Plattenstrukturen werden detailliert in „Vibration of Shells and Plates“ erläutert [7]. Eine allgemeine Einführung in die Thematik der Physikalischen Modellierung ist in „Physical modeling synthesis update“ [8] zu finden. Für die Analyse der Klangbeispiele und die Einarbeitung in die digitale Signalverarbeitung wird maßgeblich das Buch „Spectral Audio Signal Processing“ [9] herangezogen. Ein Beispiel für die numerische Umsetzung der Modalanalyse und die Vertonung eines perkussiven Membraninstruments liefert der Artikel „A Modular Physically Based Approach to the Sound Synthesis of Membrane Percussion Instruments“ [10]. Die „Physikalische Modellierung“ wurde hier im wesentlichen durch eine Kombination der Modalsynthese und verschiedenen Masse-Federelementen realisiert. Die Erschließung weiterer Quellen im Laufe der Bearbeitungszeit wird notwendig sein. Es wird ein Umfang von dreißig oder mehr Quellen angestrebt.

## 4 Arbeits- und Zeitplan

April 2013	Literaturrecherche, weitere Vorarbeiten
Mai 2013	Implementierung und Testen der analytischen Modelle, Kalibrierung der Modelle
Mai und Juni 2013	Implementierung und Testen der Analyseskripte und Methoden zum Entfernen/Stutzen der weniger wichtigen Moden, Kalibrierung der Modelle
Juli 2013	Nichtlineare Modelle erstellen, Kalibrierung der Modelle ,Komposition (wenn genug Zeit)
August 2013- Oktober 2013	Anfertigung der Arbeit

## Literatur

- [1] L. Rayleigh. *The Theory of Sound, Vol. I*. MacMillan and Company Ltd., London, 1894.
- [2] SN Hou. Review of modal synthesis techniques and a new approach. *Shock and vibration bulletin*, 40(4):25–39, 1969.
- [3] Robert Morris Hintz. Analytical methods in component modal synthesis. *AIAA Journal*, 13(8):1007–1016, 1975.
- [4] Nicholas Ellis, Joël Bensoam, and René Caussé. Modalys demonstration. In *Proc. of the 2005 International Computer Music Conference (ICMC05)*, pages 101–102, 2005.
- [5] Cynthia Bruyns. Modal synthesis for arbitrarily shaped objects. *Computer Music Journal*, 30(3):22–37, 2006.
- [6] Neville Horner Fletcher and Thomas D Rossing. *The physics of musical instruments*. Springer Verlag, 1998.
- [7] Werner Soedel. *Vibrations of shells and plates*, volume 177. CRC Press, 2004.
- [8] Julius O Smith. Physical modeling synthesis update. *Computer Music Journal*, 20(2):44–56, 1996.
- [9] Julius O. Smith. *Spectral Audio Signal Processing*. <http://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/>, accessed 14.04.2013. online book.
- [10] Federico Avanzini and Riccardo Marogna. A modular physically based approach to the sound synthesis of membrane percussion instruments. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 18(4):891–902, 2010.