

Seminararbeit aus Musikalische Akustik 2

Physical Modeling konischer Holzblasinstrumente

Manuel Planton, BSc

Betreuung: Mag.art. Dr. Robert Höldrich

SS2019

Graz, 29. April 2020



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Physikalische Modelle von konischen Holzblasinstrumenten zur Echtzeitklangsintese sind in aktiver Entwicklung. Dabei werden Modelle gesucht, die überzeugende Klangqualität und realistisches Spielverhalten besitzen. In dieser Arbeit werden Waveguide-Modelle zylindrischer und konischer Holzblasinstrumente behandelt und Implementierungen des aktuellen Forschungsstandes bewertet. Dies schafft einen Überblick über die Qualität aktueller Physical Modeling Synthese von konischen Holzblasinstrumenten mittels Waveguides.

Abstract

Physical models of conical woodwinds for real-time sound synthesis are in active development. The goal is to find models with convincing sound quality and realistic playing behavior. This work deals with waveguide models of cylindrical and conical woodwinds and implementations of the current state of research are evaluated. This provides an overview on the quality of current physical modeling synthesis of conical woodwind instruments using waveguides.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Physical Modeling	4
2	Waveguides	6
2.1	Die ideale schwingende Saite	6
2.2	zylindrische Bohrung	9
2.3	konische Bohrung	10
2.4	Anregungsmechanismen	11
3	Modellierung von Holzblasinstrumenten	13
3.1	Schallbecher	13
3.2	Tonlöcher	14
3.3	Rohrblatt	14
3.4	Effizientes Rohrblattmodell für Holzblasinstrumente	17
3.5	zylindrische Holzblasinstrumente	21
3.6	konische Holzblasinstrumente	21
4	Implementierung	24
4.1	Klarinette	25
4.2	konische Modelle	25
5	Fazit	27

1 Einleitung

Diese Arbeit behandelt Physical Modeling von Holzblasinstrumenten. Physical Modeling als echtzeitfähige Klangsynthese nutzt ein Modell basierend auf der physikalischen Analyse eines Instruments und wendet Methoden aus der Signalverarbeitung an, um die Klangerzeugung des Instruments nachzubilden. Es gibt verschiedene Arten von Physical Modeling, je nach Grundmodell und Berechnungsart. Wie unten beschrieben wird, eignen sich *Waveguides* gut zur Nachbildung von Holzblasinstrumenten wie dem Saxophon.

Das Ziel dieses Projekts im Rahmen des Seminars war die Entwicklung eines Physical Modeling Saxophon Synthesizers ohne Berücksichtigung der Schallabstrahlung und Spieltechniken des Instruments. Dabei wurde ausgehend von einem Klarinettenmodell schrittweise ein Saxophonmodell implementiert. Die verwendeten Modelle entsprechen dem aktuellen Forschungsstand in diesem Feld. [Sca02] Die Realisierung dieser Modelle ermöglicht ihren Vergleich untereinander und einen Überblick über ihre aktuelle Klangqualität und Spielbarkeit.

Es folgt ein Überblick über Physical Modeling und Holzblasinstrumente in diesem Kontext. Dieser Abschnitt schließt mit einem Überblick über die Physical Modeling Implementierungen des Projekts.

In Abschnitt 2 wird die Theorie von *Waveguides* behandelt, die nötig ist, um ein Saxophonmodell zu bilden. Die Analyse der Schallwellenausbreitung in zylindrischen und konischen Bohrungen, wie sie in Holzblasinstrumenten vorhanden sind, schafft die Grundlage des Modells.

Abschnitt 3 behandelt die Modellierung der einzelnen Teile von Holzblasinstrumenten. Das Kernstück dieser Gesamtmodelle ist das Modell für die Rohrblattschwingung am Mundstück. Es wird eine Methode zur effizienten Berechnung des Rohrblattmodells beschrieben, um die Erstellung echtzeitfähiger Algorithmen zur Klangsynthese zu ermöglichen. Schließlich werden die Gesamtmodelle von zylindrischen und konischen Holzblasinstrumenten vorgestellt.

Die Implementierung und Bewertung aktueller Modelle von Holzblasinstrumenten wird in Abschnitt 4 beschrieben.

1.1 Physical Modeling

Physical Modeling dient zur Klangsynthese ausgehend von physikalischen Modellen. Es können physikalische Vorgänge nachgebildet werden und so auch schwer oder unmöglich realisierbare virtuelle Instrumente simuliert werden. Das Verhalten des realen Instruments wird nachgebildet und es ergibt sich beim Spielen des Modells ein natürliches Verhalten. So kann z.B. das Überblasen eines Blasinstrumentes rein mit den original spielbaren Parametern erfolgen.

Die Physik, im Speziellen die musikalische Akustik, liefert mittels physikalischen Modellen eine mathematische Beschreibung von beobachteten Phänomenen. Bei der Klangerzeugung handelt es sich um dynamische physikalische Vorgänge. Die mathematische

Beschreibung dieser Vorgänge erfolgt größtenteils mit gewöhnlichen oder partiellen Differentialgleichungen. Aus ihnen können für die direkte numerische Simulation des Modells die *Differenzengleichungen* gebildet oder die *Finite-Differenzen-Methode* herangezogen werden.

Die Beschreibung eines physikalischen Systems kann jedoch auch mittels *Zustandsraumdarstellung* oder *Übertragungsfunktion* erfolgen. In dieser Darstellung wird vorausgesetzt, dass es sich um ein lineares zeitinvariantes System handelt.

Verschiedene Physical Modeling Ansätze sind:

- *Feder-Masse-Systeme*, die komplexe Modelle mit Federn, Massen und Dämpfungsgliedern nachbilden
- Die *Modalsynthese*, bei der die Schwingungsmoden eines Systems (vgl. Resonanzverhalten, Eigenschwingung) nachgebildet werden
- *Digital Waveguides*, die die Wellenausbreitung in einem physikalischen Modell nachbilden

Die Qualität der Nachbildung eines physikalischen Vorgangs mittels Physical Modeling Methoden variiert stark je nach Phänomen und Komplexität des Systems.¹ Beispielsweise ist eine isolierte schwingende Saite einfacher nachzubilden, als eine gesamte Gitarre. Weiters sind lineare Vorgänge mathematisch einfacher beschreibbar, als nichtlineare Vorgänge. Je komplexer das nachzubildende System ist, bzw. je schwieriger die mathematische Beschreibung ist, desto mehr Vereinfachungen sind im Modell notwendig, um es simulieren zu können, bzw. damit es überhaupt möglich ist, eine Lösung zur Simulation zu erhalten.

Holzblasinstrumente Gerade Blasinstrumente sind mit Physical Modeling schwer nachzubilden. [Smi10, Kap. But How Does It Sound?] Die Nachbildung der Bohrung von Holzblasinstrumenten geschieht am besten mit einem Waveguide-Modell. Das Rohrblatt als nichtlinearer Anregungsmechanismus des Systems ist zentraler Bestandteil des gesamten Modells. Zylindrische Holzblasinstrumente, wie Klarinetten können aufgrund der einfacheren Modellierung bereits gut nachgebildet werden. Die aktuelle Literatur zur Nachbildung von konischen Holzblasinstrumenten mittels Physical Modeling stammt von Scavone aus dem Jahr 2002. [Sca02] Darin werden mehrere Modellansätze erläutert und schließlich als bestes Modell ein physikalisch nicht mögliches präsentiert (Die virtuelle angeblasene Saite).

Implementierung Da zylindrische Holzblasinstrumente einfacher als konische Holzblasinstrumente mittels Waveguides nachgebildet werden können, wurde ausgehend von einer einfachen Klarinettenimplementierung schrittweise ein Saxophon-Synthesizer entwickelt. Die Implementierung erfolgte in der Programmiersprache Pure Data.

1. bezogen auf die Qualität des Modells, ohne Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der numerischen Berechnung

2 Waveguides

Digital Waveguides [Smi10], kurz Waveguides, ist eine Physical Modeling Methode, die die Wellenausbreitung in einem Medium effizient nachbildet. In diesem Abschnitt werden die Waveguide-Modelle für zylindrische und konische Bohrungen hergeleitet. Zuerst wird das Waveguide-Modell der idealen schwingenden Saite beschrieben, das als einfachstes Beispiel einen guten Einstieg in die Waveguide Theorie ermöglicht.

Die mathematische Beschreibung der eindimensionalen Wellenausbreitung besteht aus der Superposition von hinlaufender und zurücklaufender Welle. Gibt es im Bereich der Wellenausbreitung einen Wechsel des Ausbreitungsmediums mit unterschiedlichen Wellenwiderständen, so kommt es allgemein zur Reflexion und Transmission der Welle an der Grenzfläche der Medien. Prinzipiell bestehen Waveguide-Modelle aus

- *Waveguides*, die die zeitliche Verzögerung der verlustlosen Wellenausbreitung von hinlaufender und zurücklaufender Welle zwischen zwei Punkten modellieren
- *Scattering Junctions*, die allgemein einen Wechsel des Ausbreitungsmediums beschreiben

In dieser Arbeit wird die allgemeine Theorie zu *Scattering Junctions* nicht erläutert, da in Holzblasinstrumenten ausschließlich speziellere Medienwechsel vorkommen, die in Abschnitt 3 beschrieben werden.² Für ein einfaches Modell von Holzblasinstrumenten reicht es aus, eindimensionale Wellenausbreitung mit Waveguides zu modellieren.

2.1 Die ideale schwingende Saite

Die ideale schwingende Saite modelliert die Auslenkung $y(t, x)$ einer massebehafteten unendlich langen Saite mit Saitendichte ϵ entlang einer Raumachse x , wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Sie ist ideal bezüglich Flexibilität und Elastizität [Smi10, Kap. Ideal Vibrating String] und auf sie wirkt die Saitenspannung K .

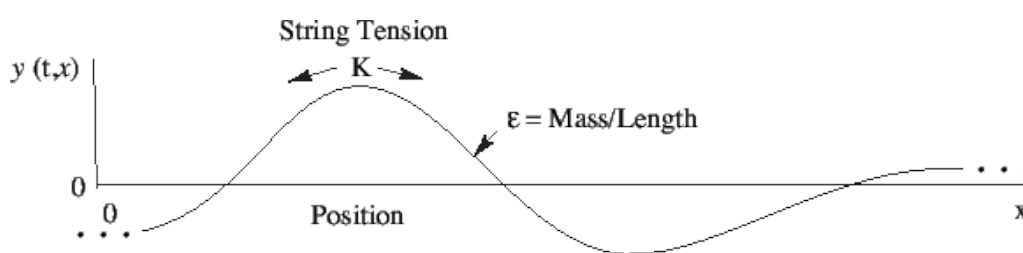


Abbildung 1 – ideale schwingende Saite aus [Smi10]

Aufstellung der Wellengleichung Ausgehend vom zweiten Newton'schen Gesetz

$$F = ma, \tag{1}$$

2. Siehe [Smi10, Kap. Scattering at Impedance Changes] für die Beschreibung von Scattering Junctions.

wird das Kräftegleichgewicht der Saite mit

$$Ky'' = \epsilon \ddot{y} \quad (2)$$

beschrieben. Die Saitenspannung mal der Krümmung der Saite ($y'' = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$) ist gleich groß, wie die Saitendichte mal der Beschleunigung der Saite ($\ddot{y} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$).

Definiert man nun die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle c mit

$$c = \sqrt{\frac{K}{\epsilon}}, \quad (3)$$

kann der Ausdruck (2) in der Form

$$y'' = \frac{1}{c^2} \ddot{y} \quad (4)$$

geschrieben werden.

Diese lineare partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung ist die eindimensionale homogene Wellengleichung. Ihre Lösung beschreibt die Wellenausbreitung auf der Saite.

Lösung der Wellengleichung Die Lösung der eindimensionalen Wellengleichung

$$y(t, x) = y_r(t - x/c) + y_l(t + x/c) \quad (5)$$

nach d'Alembert [Wei] besteht aus der Superposition einer rechts-laufenden Welle y_r und einer links-laufenden Welle y_l .

Diskretisierung der Lösung Für eine numerische Berechnung der Wellenausbreitung wird die kontinuierliche Lösung der Wellengleichung sowohl örtlich, als auch zeitlich diskretisiert. T sei das zeitliche Diskretisierungsintervall in Sekunden und $X = cT$ sei das örtliche Diskretisierungsintervall. Setzt man nun $t = nT$ und $x = mX$ in (5), so ergibt sich der Ausdruck

$$y(nT, mX) = y_r(nT - m\frac{X}{c}) + y_l(nT + m\frac{X}{c}). \quad (6)$$

Mit $X = cT$ kann man die verkürzte diskretisierte Form der Lösung der Wellengleichung

$$y(nT, mX) = y_r(nT - mT) + y_l(nT + mT) = y^+(n - m) + y^-(n + m) \quad (7)$$

angeben.

Dies ist eine günstige Form für die digitale Signalverarbeitung.

Reflexionsverhalten Gleichung (7) beschreibt Wellen, die sich unendlich weit auf der unendlich langen idealen Saite ausbreiten. Das Reflexionsverhalten kann untersucht werden, indem man Randbedingungen für die örtliche Fixierung der Saite bei $x = 0$ und $x = L$ einsetzt.

$$y(t, 0) \equiv 0; y(t, L) \equiv 0 \quad (8)$$

$$y(nT, 0) = y^+(n) + y^-(n) \equiv 0 \Leftrightarrow y^+(n) = -y^-(n) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y(nT, NX/2) &= y^+(n - N/2) + y^-(n + N/2) \equiv 0 \\ &\Leftrightarrow y^-(n + N/2) = -y^+(n - N/2) \end{aligned} \quad (10)$$

Es kommt also zu einem Vorzeichenwechsel bei der Reflexion am fixierten Ende der Saite.

Waveguide-Modell Das Waveguide-Modell der endlichen Saite ist in Abbildung 2 zusehen. Die Vorzeichenwechsel an den Saitenenden bei Reflexion werden mit einer Multiplikation mit -1 erreicht. Die Simulation der Wellenausbreitung der hin- und zurücklaufenden Welle auf der Saite geschieht mittels Delay Lines.

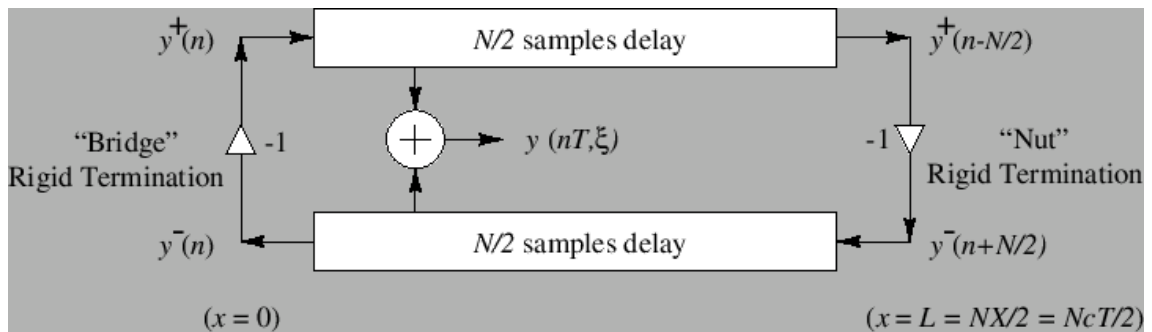


Abbildung 2 – An den Enden fixierte Saite aus [Smi10]

$y(nT, \xi)$ ist die Auslenkung der Saite an der Stelle ξ .

Reflexionsverhalten verschiedener Größen Verschiedene Größen von Wellen zeigen unterschiedliches Verhalten bei Reflexion. Einige Größen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Bis jetzt wurde nur die Totalreflexion behandelt. An der Grenze der Ausbreitungsmedien mit unterschiedlichen Impedanzen kommt es im Allgemeinen zur Teilreflexion und Transmission einer Welle ins zweite Medium (Für die Betrachtung von Impedanzen siehe [Smi10, Kap. Wave Impedance]).

Größe	Verhalten
Auslenkung y	Vorzeichenwechsel
Geschwindigkeit v	Vorzeichenwechsel
Beschleunigung a	Vorzeichenwechsel
Kraft F	kein Vorzeichenwechsel
Druck p	kein Vorzeichenwechsel

Tabelle 1 – Reflexionsverhalten an einem fixierten Abschluss

2.2 zylindrische Bohrung

Die Bohrung von Instrumenten enthält die Luftsäule, in der die Wellenausbreitung im Instrument geschieht. Wie bei der schwingenden Saite ist ihre Länge ein frequenzbestimmender Parameter. Nun wird jedoch nicht mehr die Versetzung $y(t, x)$ betrachtet, die bei einer Transversalwelle einer Saite eine anschauliche Größe ist, sondern der Druck $p(t, x)$ entlang der Bohrung. Wie auch bei Schallwellen im Freifeld handelt es sich bei der Druckwelle in der Bohrung um eine Longitudinalwelle. Da der Radius eines Zylinders konstant ist und somit auch die Querschnittfläche, breitet sich in einer zylindrischen Bohrung eine ebene Welle aus.

zylindrischer Waveguide Die Wellengleichung für die Druckwelle in einem Zylinder

$$p'' = \frac{1}{c^2} \ddot{p} \quad (11)$$

hat die gleiche Form wie die Versetzungswelle der idealen schwingenden Saite Glg. (4). Somit kann die Herleitung für das Waveguide-Modell einer zylindrischen Bohrung aus Abschnitt 2.1 übernommen werden.

Die diskretisierte Lösung der Druckwellengleichung ist somit

$$p(mX, nT) = p^+(n - m) + p^-(n + m) \quad (12)$$

und in Abbildung 3 ist das zugehörige Waveguide-Modell zu sehen.

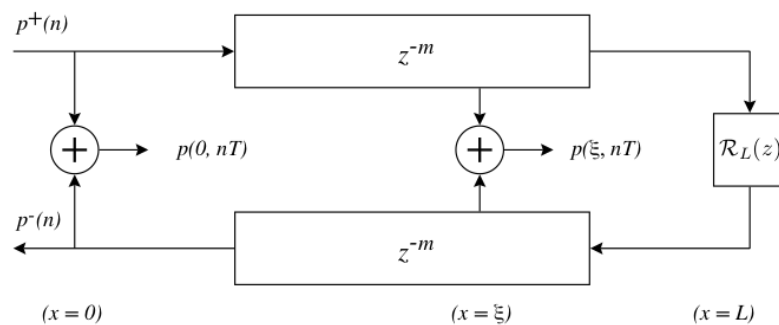


Abbildung 3 – zylindrischer Waveguide aus [Sca02]

Die zylindrische Bohrung der Länge L wird nach diesem Modell vom Druck $p^+(n)$ an der Stelle $x = 0$ angeregt. Die eingehende Welle läuft den Zylinder entlang und trifft am Zylinderende bei $x = L$ auf eine Impedanz $\mathcal{R}_L(z)$. Je nach Gestaltung des Zylinderendes, kann dieser Reflexionsfilter $\mathcal{R}_L(z)$ unterschiedliche Formen annehmen (siehe Abschnitt 3.1 für einen Schallbecher). Der reflektierte Anteil läuft den Zylinder nun in entgegengesetzter Richtung entlang und schließlich erscheint der Druck $p^-(n)$ an der Stelle $x = 0$. Der Druck $p(\xi, nT)$ an jeder Stelle $x = \xi$ des Waveguides kann durch Superposition von $p^+(n)$ und $p^-(n)$ gebildet werden.

2.3 konische Bohrung

Bei einer konischen Bohrung ist der Radius und somit die Querschnittsfläche von der Position x abhängig. Die sich ausbreitende Wellenfront in der konischen Bohrung hat die Form einer Kugelkappe, wie es in Abbildung 4 im Längsschnitt angedeutet ist. Die Wellenausbreitung kann als eindimensionale sphärische Druckwelle entlang der Bohrungsachse beschrieben werden. [Smi10, Kap. Conical Acoustic Tubes]

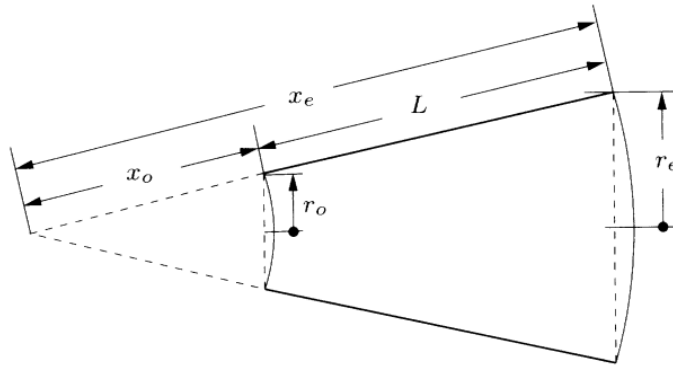


Abbildung 4 – abgeschnittene konische Bohrung aus [Sca02]

Es ergibt sich die sphärische Druckwellengleichung

$$\frac{1}{x} \frac{\partial^2 (xp)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (13)$$

und die diskretisierte Lösung hat die Form

$$p(nT, mX) = \frac{p^+(n-m)}{x} + \frac{p^-(n+m)}{x}. \quad (14)$$

Bei Musikinstrumenten ist der Konus jedoch immer abgeschnitten, wie in Abbildung 4.

„Prinzipiell sind die Ausdrücke, die die Wechselwirkung von Kugelwellen beschreiben frequenzabhängig, während die, die Streuung von ebenen Wellen beschreiben, oft einfache skalare Funktionen sind.“³ [Sca02]

3. In general, expressions describing the interaction of spherical waves will be frequency-dependent, while those for plane-wave scattering are often simple scalar functions.

Bei fest abgeschlossenem Eingang ist die Laplace-Transformierte des Reflexionsgrads $R_o(s)$ am Eingang an der Stelle x_o gegeben durch

$$R_o(s) = \frac{P_o^-(s)}{P_o^+(s)} = \frac{x_o s - c}{x_o s + c} \quad (15)$$

mit der Schallgeschwindigkeit c .

Diskretisierung mittels Bilineartransformation Für die Verwendung in der digitalen Signalverarbeitung wird der Reflexionsgrad mit der Bilineartransformation [OS14, 528-532] diskretisiert. Diese erfolgt wie in [Sca97, 99] durch die Substitution

$$s = \alpha \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}. \quad (16)$$

Die Bilineartransformationskonstante α kontrolliert die nichtlineare Frequenzachsenverzerrung des Frequenzgangs des analogen Systems durch die Transformation in den diskreten Frequenzbereich. Diese Verzerrung wird durch die nichtlineare Abbildung des zeitkontinuierlichen Frequenzbereichs $-\infty \leq \Omega \leq \infty$ auf den zeitdiskreten Frequenzbereich $-\pi \leq \omega \leq \pi$ verursacht. Die $j\Omega$ -Achse in der s -Ebene wird einmal um den Einheitskreis in der z -Ebene abgebildet.

Die Konstante ist typisch $\alpha = 2/T_d$ mit der Schrittweite T_d der numerischen Integration. Die Festlegung von T_d kann jedoch vernachlässigt werden und bietet einen freien Parameter mit Einfluss auf die Frequenzverzerrung, wie in [OS14, 529] und [Sca97, 99] beschrieben. „Für Phasengleichheit bei tiefen Frequenzen kann α auf die doppelte Abtastrate $2f_s$ gesetzt werden.“ [Sca97, 106]

Es ergibt sich der diskretisierte Reflexionsgrad

$$R_o(z) = \frac{-a_1 - z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (17)$$

mit dem Parameter $a_1 = \frac{c - \alpha x_o}{c + \alpha x_o}$.

Diese Filterform ist ein Allpassfilter erster Ordnung. Das Waveguide-Modell der konischen Bohrung ist in Abbildung 5 zu sehen.

Wie oben bei dem Waveguide-Modell einer zylindrischen Bohrung kann auch hier vorerst nur allgemein ein Reflexionsfilter R_e (oben \mathcal{R}_L) angegeben werden. In Abschnitt 3.1 wird das Reflexionsfilter für einen angefügten Schallbecher betrachtet.

2.4 Anregungsmechanismen

Die vorgestellten Waveguide-Modelle setzen voraus, dass eine Anregung entweder durch einen bereits beim Start der Simulation vorhandenen Wellenverlauf geschieht, oder dass extern eine Größe eingekoppelt werden kann. Zur Verwendung mit weiteren Modellen,

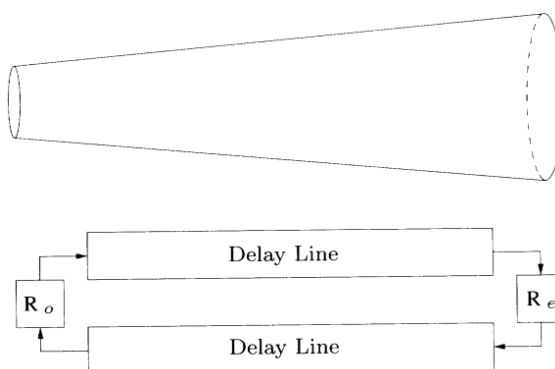


Abbildung 5 – konischer Waveguide aus [Sca02]

um ganze Instrumente nachzubilden, wird die Größe der simulierten Welle in das Modell eingespeist und wie in den vorgestellten Waveguide-Modellen an einer Stelle $x = \xi$ abgegriffen.

Bei den Anregungsmechanismen kann zwischen impulsartiger Anregung, wie beim Zupfen einer Saite und kontinuierlicher Anregung, wie beim Streichen einer Saite, unterschieden werden. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, regt eine Energiequelle beim Erzeugen einer kontinuierlichen Oszillation über ein nichtlineares Element einen linearen passiven Resonator an. [CK16, 470-471] Es existiert eine Rückkopplung zwischen dem Resonator und dem nichtlinearen Element, welches also als Anregungsmechanismus dient.

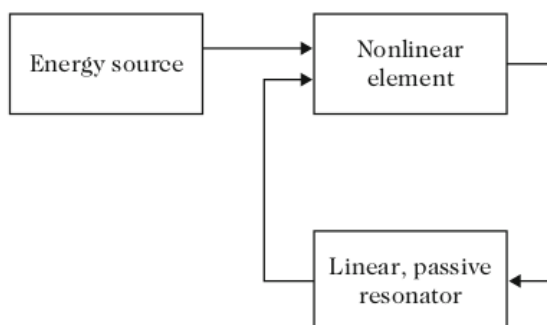


Abbildung 6 – Anregung für kontinuierliche Oszillation aus [CK16, 470]

Die quasistationäre Ausgangsgröße der Energiequelle wird über den Anregungsmechanismus und mittels der Rückkopplung des Resonators in eine kontinuierliche Schwingung umgesetzt. Dieser Vorgang muss also zwingend nichtlinear sein, da sonst keine kontinuierliche Oszillation möglich wäre.

Die Bohrung eines Holzblasinstruments entspricht dem passiven Resonator und das Rohrblatt am Mundstück entspricht dem nichtlinearen Element.

3 Modellierung von Holzblasinstrumenten

Ausgehend von den Waveguide-Modellen für die Bohrungen der Holzblasinstrumente können nun Modelle entwickelt werden, um ganze Instrumente zu simulieren. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Bestandteile von Holzblasinstrumenten analysiert und modelliert, um schließlich Gesamtmodelle für zylindrische und konische Holzblasinstrumente zu konstruieren.

In Abbildung 7 ist ein grobes Waveguide-Modell einer Klarinette zu sehen.

Die einzelnen Bestandteile sind von rechts nach links:

- Schallbecher
- Tonlöcher (in der Bohrung)
- Bohrung
- Rohrblatt

Die Eingangsgrößen des Modells, mit denen das Instrument auch bei der Simulation gespielt wird, sind der Druck im Inneren des Mundes p_m , eine Größe für den Ansatz und die gespielte Note auf den Tonlöchern. Wird die Schallabstrahlung über die Tonlöcher nicht berücksichtigt, so ist die Ausgangsgröße der Druck am Ende des Schallbechers.

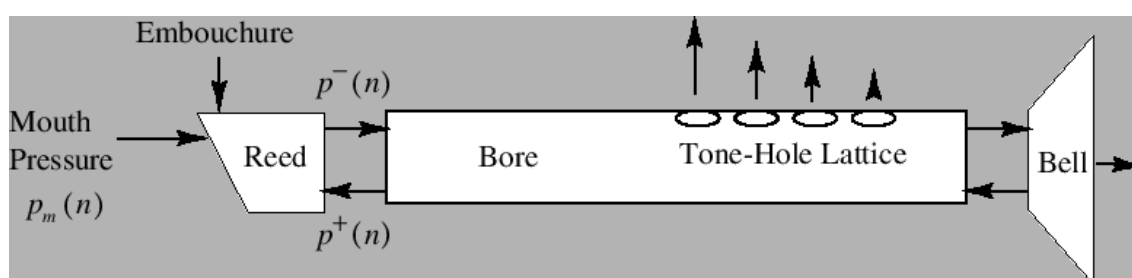


Abbildung 7 – Grobes Waveguide-Modell einer Klarinette aus [Smi10]

Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf der Entwicklung des Rohrblattmodells, welches die Grundvoraussetzung ist, um ein einfaches Instrumentenmodell entwickeln und implementieren zu können. Ausgehend von einfachen Modellen, können bestimmte Bereiche des Instruments bei Bedarf genauer modelliert werden.

3.1 Schallbecher

Von der Bohrung aus gesehen, werden am Schallbecher Wellen mit tiefen Frequenzen reflektiert und Wellen mit hohen Frequenzen nach außen durchgelassen. Die Übergangsfrequenz dieses Verhaltens wird vom Durchmesser des Schallbechers bestimmt. Dieser Durchmesser gilt also als Vergleich für die Wellenlängen tiefer und hoher Frequenzen.

Vereinfacht wird dieses Verhalten mit einem Tiefpass als *Reflexionsfilter* und mit einem Hochpass als Ausgangsfilter des Instruments nachgebildet.

3.2 Tonlöcher

Es gibt verschiedene Modelle um die Impedanzen von Tonlöchern zu berechnen und zu simulieren. Dabei werden entweder die einzelnen Tonlöcher als „Streuungsknoten“ (scattering junctions) beschrieben [CK16, 364 ff.], oder Schallbecher und alle Tonlöcher als Reflexions- und Ausgangsfilter zusammengefasst. [Smi10, Kap. Tonehole Modeling]

Bei einfachen Griffen wird die schwingende Luftsäule durch das erste offene Tonloch abgeschlossen. Somit ist das einfachste Tonlochmodell die Einstellung der Delay Line Längen des zylindrischen oder konischen Waveguides für die gespielte Note.

Sowohl Tonlochverluste, als auch das Schallbecherverhalten und die Dissipation durch Schallausbreitung in der Bohrung werden mit dem *Reflexionsfilter* (und Ausgangsfilter) modelliert.

3.3 Rohrblatt

Das Rohrblattmodell ist als Anregungsmechanismus der Zentrale Baustein der Gesamtmodelle für Holzblasinstrumente. Die Mundstücke und die darauf befestigten Rohrblätter für Klarinette und Saxophon sind so ähnlich, dass das selbe Modell zur Simulation beider Instrumente verwendet werden kann.

Zuerst wird die Klingerzeugung durch Rohrblatt-Vibrationen am Mundstück beschrieben. Anschließend in Abschnitt 3.4 wird ein effizientes Modell zur Simulation hergeleitet.

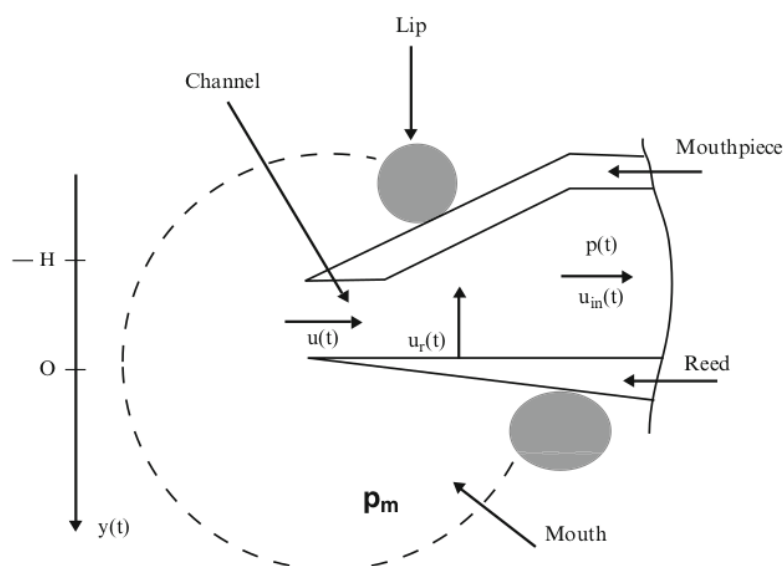


Abbildung 8 – Schema eines Klarinettenmundstücks aus [CK16]

Klangerzeugung durch Rohrblatt-Vibrationen In Abbildung 8 ist das Schema eines Klarinettenmundstücks zu sehen. Das Rohrblatt ist unten am Mundstück angefügt. Vorne an der Spitze gibt es einen Kanal zwischen Mundstück und Rohrblatt. Der Instrumentalist umschließt Mundstück und Rohrblatt mit den Lippen und baut beim Spielen den Munddruck p_m auf. Es entsteht ein Fluss u durch den Kanal wodurch das Rohrblatt zum Schwingen angeregt wird.

Dieses Verhalten eines Rohrblattgenerators kann durch ein *druckgesteuertes Ventil* modelliert werden. Die Masse des Rohrblatts wird dabei vernachlässigt. Somit wird ein dreidimensionaler Vorgang mit einem eindimensionalen Modell beschrieben.

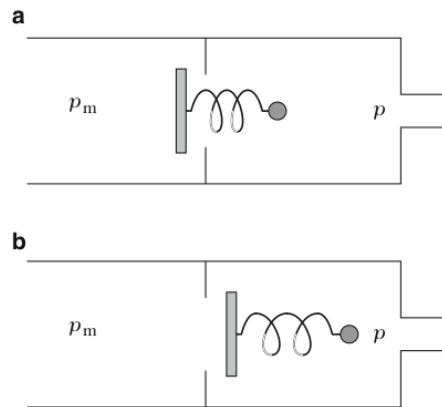


Abbildung 9 – druckgesteuertes Ventil aus [CK16]

Abbildung 9a zeigt ein sich *schließendes* druckgesteuertes Ventil für $p_m > p$, welches als Rohrblattmodell dient. In Abbildung 9b ist ein sich *öffnendes* druckgesteuertes Ventil, das als Modell für die Lippenbewegung beim Spielen von Blechblasinstrumenten verwendet werden kann.

Die Untersuchung des Verhaltens von Schallfluss u zur Druckdifferenz $(p_m - p)$ und die Herleitung der Admittanz Y_r des schließenden druckgesteuerten Ventils erfolgt in [FR91, 347 ff.]. Das nichtlineare Verhalten des Rohrblatts ist in Abbildung 10 zu sehen. Die Durchgängige Kurve zeigt den Verlauf von u zu $(p_m - p)$ für das schließende druckgesteuerte Ventil. Vom Ausgangspunkt **O** aus führt eine Erhöhung der Druckdifferenz auch zu einem Anstieg des Flusses bis zum Punkt **A**. Wird die Druckdifferenz weiter erhöht, so verringert sich ab **A** der Fluss, bis das Ventil im Punkt **C** vollkommen geschlossen ist.

Betrachtet man nun die Formel für die Admittanz des Mundstücks

$$Y_r = - \left. \frac{\partial u}{\partial p} \right|_{p_m} = \frac{\partial u}{\partial (p_m - p)} \quad (18)$$

von der Seite des Mundstückausgangs aus gesehen, stellt man fest, dass Y_r und somit auch die Impedanz Z_r positiv zwischen **O** und **A** sind und negativ zwischen **A** und **C** sind.

Ein negativer Widerstand entspricht einem Generatorverhalten. Also wird dem Schallfeld zwischen **A** und **C** Energie zugeführt, was dem Vorgang der Klangerzeugung entspricht.

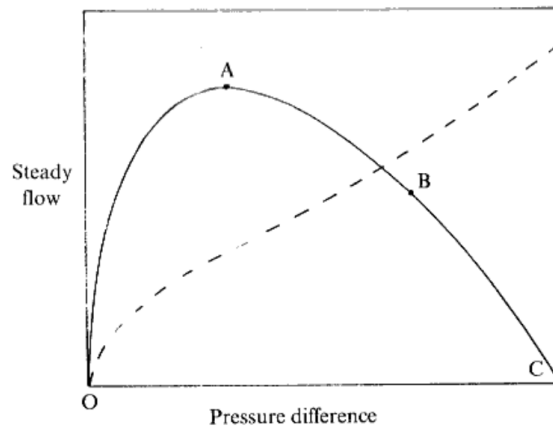


Abbildung 10 – nichtlineares Verhalten des Rohrblatts aus [FR91]

Die Beschreibung dieses Verhalten ist mit nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen möglich, für die jedoch keine allgemeine analytische Lösung existiert. [FR91, 351] Daher erfolgt eine lineare Approximation für das Kleinsignalverhalten von \underline{Y}_r , was vergleichbar mit der Betrachtung eines Transistorverstärkers mit idealem Arbeitspunkt **B** ist. p und u bewegen sich dabei sinusförmig mit Frequenz ω und kleiner Amplitude um ihre Ruhewerte im Arbeitspunkt.

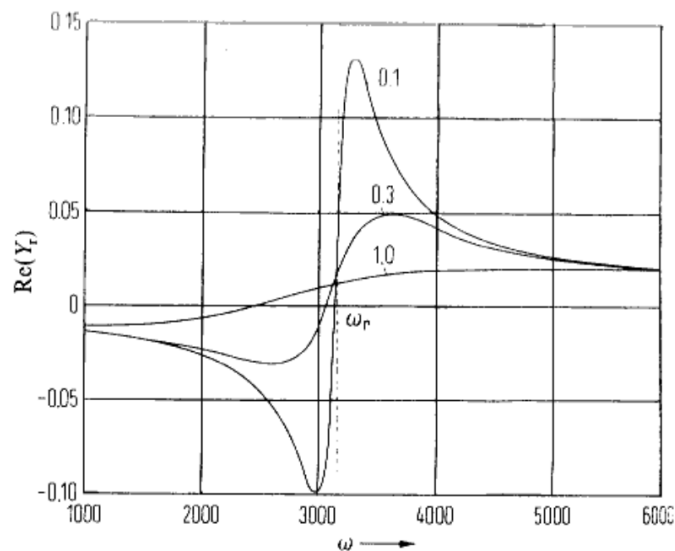


Abbildung 11 – Resonanzverhalten aus [FR91]

Der Amplitudengang⁴ von \underline{Y}_r ist in Abbildung 11 zu sehen. Es sind Kurven für drei verschiedene Dämpfungskoeffizienten γ_5 eingezeichnet und ω_r bezeichnet die Resonanzfrequenz. Das Generatorverhalten, bei dem $\text{Re}\{\underline{Y}_r\} < 0$, ist bis knapp unter die Ventil-Resonanzfrequenz ω_r möglich. Eine leichte Dämpfung ($\gamma_5 = 0.1$), die eine scharfe Resonanz zur Folge hat kommt bei Metallblättern für Orgelpfeifen vor. Der stark gedämpfte

4. $\text{Re}\{\underline{Y}_r\}$ über ω

Generatortyp ($\gamma_5 > 0.3$) ist charakteristisch für Rohrblätter von Klarinetten und Saxophone.

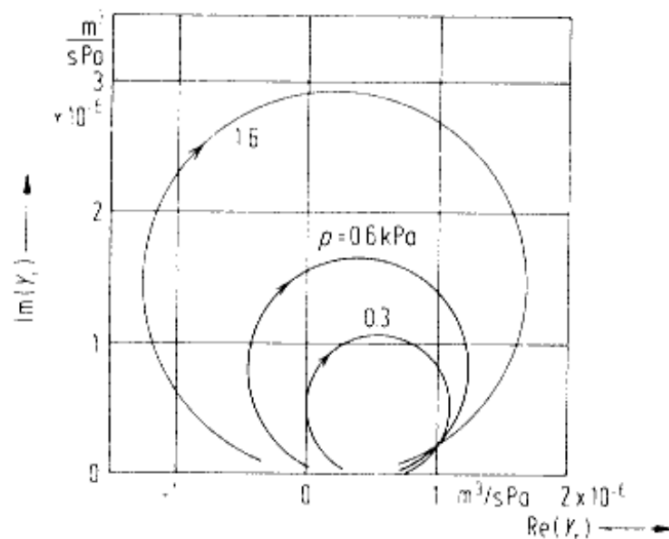


Abbildung 12 – Generatorverhalten aus [FR91]

In Abbildung 12 sind die Ortskurven von Y_r für verschiedene Munddrücke p_m abgebildet. Generatorverhalten zeigt sich in der linken komplexen Halbebene. Es ist auch ersichtlich, dass p_m groß genug sein muss, damit das Ventil bzw. das Rohrblatt als Generator arbeiten und somit Klang erzeugen kann.

Resonatoren für Rohrblattgeneratoren Da Rohrblattgeneratoren druckgesteuert sind, müssen sie am Eingang eines Resonators arbeiten, der ihnen eine maximale Druckänderung bietet. Das entspricht einem *Eingangsimpedanzmaximum* für den Resonator. Zylindrische Resonatoren haben Eingangsimpedanzmaxima entlang ungerader Teiltöne und konische Resonatoren haben Eingangsimpedanzmaxima entlang aller Teiltöne.

3.4 Effizientes Rohrblattmodell für Holzblasinstrumente

Zur echtzeitfähigen Simulation eines Rohrblatts wird ein effizient berechenbares Modell benötigt. Dabei sollen so wenig Rechenoperationen wie möglich auftreten.

Das hier verwendete Modell wurde von Julius O. Smith in [Smi86] vorgestellt. Es „(...) benötigt 1 Multiplikation, 2 Additionen und 1 (kleinen) Table Lookup pro Sample von synthetisiertem Klang.“ [Smi86]

Da hier das Rohrblatt modelliert wird, sind nun die Richtungen der eingehenden und ausgehenden Druckwelle im Vergleich zu den Waveguide-Modellen vertauscht. In Abbildung 13 ist ein vereinfachtes Schema eines Mundstücks abgebildet.

p_m bezeichnet den Druck im Mund und u_m bezeichnet den Schallfluss vom Mund in die

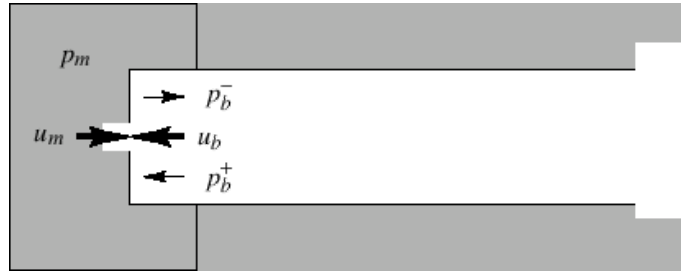


Abbildung 13 – vereinfachtes Mundstück aus [Smi10]

Bohrung. u_b ist der Fluss von der Bohrung in die Mundhöhle. p_b beschreibt den Druck in der Bohrung und wird mit

$$p_b = p_b^+ + p_b^- \quad (19)$$

aus der eingehenden (p_b^+) und ausgehenden (p_b^-) Druckwelle innerhalb der Bohrung aus der Sichtweise des Mundstücks bzw. des Rohrblatts berechnet. Somit kann die Druckdifferenz am Rohrblatt mit

$$p_\Delta = p_m - p_b \quad (20)$$

gebildet werden.

Die grundsätzliche Aufgabe besteht aus der Berechnung von p_b^- aus gegebenen p_m und p_b^+ . Die Rohrblattöffnungsimpedanz $R_m(p_\Delta)$ hängt von der Blattposition ab und ist somit eine Funktion von p_Δ . Die Schallflüsse müssen in Summe null ergeben

$$u_m + u_b = 0 \quad (21)$$

und u_m berechnet sich mit

$$u_m(p_\Delta) = \frac{p_\Delta}{R_m(p_\Delta)} \quad (22)$$

und ist somit auch eine Funktion von p_Δ .

Mit dem Ausdruck

$$u_b = u_b^+ + u_b^- = \frac{p_b^+ - p_b^-}{R_b} \quad (23)$$

und der Definition der Wellenimpedanz R_b der Luftsäule in der Bohrung

$$R_b = \frac{\rho_{air} c}{S}, \quad (24)$$

(mit der Luftdichte ρ_{air} , der Schallgeschwindigkeit c und der Fläche des Rohrquerschnitts S) kann das Gleichungssystem

$$u_m + u_b = \frac{p_\Delta}{R_m(p_\Delta)} + \frac{p_b^+ - p_b^-}{R_b} = 0 \quad (25)$$

$$p_\Delta = p_m - p_b = p_m - (p_b^+ + p_b^-) \quad (26)$$

gebildet werden.

Lösung des Gleichungssystems Die Gleichungen (25) und (26) können nicht einfach nach p_b^- aufgelöst werden, weil $R_m = f(p_\Delta)$ und $p_\Delta = f(p_b^-)$. Für die Auflösung dieses Gleichungssystems nach p_b^- wurden graphische Lösungsverfahren entwickelt, die jedoch zu einem aufwändigen Algorithmus mit variablen Konvergenzzeiten führen. Nach Julius O. Smith in [Smi10, Kap. Scattering-Theoretic Formulation] erfolgt die Lösung mittels Umformung in einen *signalabhängigen Reflexionskoeffizienten*.

Mit dem Impedanzverhältnis r

$$r(p_\Delta) = \frac{R_b}{R_m(p_\Delta)} \quad (27)$$

und dem *signalabhängigen Reflexionskoeffizienten* ρ

$$\rho(p_\Delta) = \frac{1 - r(p_\Delta)}{1 + r(p_\Delta)} \quad (28)$$

kann p_b^- mit dem Ausdruck

$$p_b^- = \frac{1 - r}{1 + r} p_b^+ + \frac{r}{1 + r} p_m = \rho p_b^+ + \frac{1 - \rho}{2} p_m = \frac{p_m}{2} - \rho \frac{p_\Delta^+}{2} \quad (29)$$

berechnet werden.

$$p_\Delta^+ = p_m - 2p_b \quad (30)$$

Schneller Algorithmus Nun kann ein Algorithmus basierend auf vorausberechnete Nichtlinearitäten entwickelt werden. Das Ziel ist die schnelle Berechnung von ρ .

Mit der Nomenklatur: $h_m = \frac{p_m}{2}$; $h_\Delta^+ = \frac{p_\Delta^+}{2}$ folgt aus Glg. (29)

$$p_b^- = h_m - \rho(p_\Delta) h_\Delta^+ \quad (31)$$

$$p_b^+ - p_b^- = p_b^+ + \rho h_\Delta^+ - h_m = p_\Delta - p_\Delta^+ \quad (32)$$

$$\Leftrightarrow \rho h_{\Delta}^{+} = \underbrace{h_m - p_b^{+}}_{=h_{\Delta}^{+}} + p_{\Delta} - 2h_{\Delta}^{+} = p_{\Delta} - h_{\Delta}^{+} \quad (33)$$

$$\Leftrightarrow \rho = \frac{p_{\Delta}}{h_{\Delta}^{+}} - 1 \quad (34)$$

Glg. (34) wird benutzt, um ρ als Funktion von h_{Δ}^{+} voraus zu berechnen. Bezeichnet man den *vorausberechneten Reflexionskoeffizienten* als $\hat{\rho}$

$$\hat{\rho}(h_{\Delta}^{+}) = \rho(p_{\Delta}(h_{\Delta}^{+})), \quad (35)$$

so kann p_b^{-} schließlich mittels

$$p_b^{-} = h_m - \hat{\rho} h_{\Delta}^{+} \quad (36)$$

berechnet werden.

In dieser Form benötigt die Berechnung nur 2 Subtraktionen, 1 Multiplikation und einen Table Lookup pro Sample. In Abbildung 14 ist $\hat{\rho}(h_{\Delta}^{+})$ dargestellt.

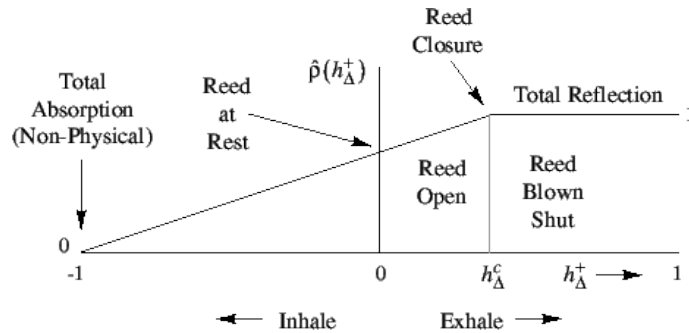


Abbildung 14 – signalabhängiger Reflexionskoeffizient aus [Smi10]

$h_{\Delta}^{+} = 0$ entspricht der Ruhelage des Rohrblatts. Von der Ruhelage aus steigt der Reflexionskoeffizient linear mit Erhöhung von h_{Δ}^{+} an, bis die Öffnung zwischen Rohrblatt und Mundstück geschlossen ist. An diesem Punkt kommt es zur Totalreflexion der Druckwelle p_b^{+} , was einem Reflexionskoeffizienten von $\hat{\rho} = 1$ entspricht. Für die stückweise Definition des vorausberechneten Reflexionskoeffizienten

$$\hat{\rho}(h_{\Delta}^{+}) = \begin{cases} 1 - m(h_{\Delta}^c - h_{\Delta}^{+}), & -1 \leq h_{\Delta}^{+} < h_{\Delta}^c \\ 1, & h_{\Delta}^c \leq h_{\Delta}^{+} \leq 1 \end{cases} \quad (37)$$

wird der kleinste Differenzdruck, der zur Schließung der Öffnung führt mit h_{Δ}^c bezeichnet. Man erhält die Steigung m mit

$$m = \frac{1}{h_{\Delta}^c + 1}. \quad (38)$$

Die Stärke des Ansatzes des Instrumentalisten (Rohrblattdämpfung und Distanz zwischen Rohrblatt und Mundstück) und die Blattsteifigkeit entsprechen der Wahl von h_{Δ}^c . Es können mit diesem vorausberechneten Reflexionskoeffizienten hellere Töne erzeugt werden, wenn man die Krümmung seines Verlaufs erhöht. Dies kann mittels $\hat{\rho}^k(h_{\Delta}^+)$ mit dem Exponenten $k \geq 1$ erfolgen.

3.5 zylindrische Holzblasinstrumente

Das Modell für eine Klarinette ist in Abbildung 15 zu sehen. Das Rohrblattmodell ist an das Waveguide-Modell für eine zylindrische Bohrung über p_b^- und p_b^+ angekoppelt. Am anderen Ende des Waveguides befindet sich das Reflexionsfilter als Modell des Schallbechers. Ein komplementäres Ausgangsfilter bildet das Ausgangssignal der Klarinette, welches vom Schallbecher abgestrahlt wird. Die erzeugte Tonhöhe wird mit der Länge der Delay Lines des Waveguides bestimmt, wobei eine Kompensation der Gruppenlaufzeit des Reflexionsfilters notwendig sein kann.

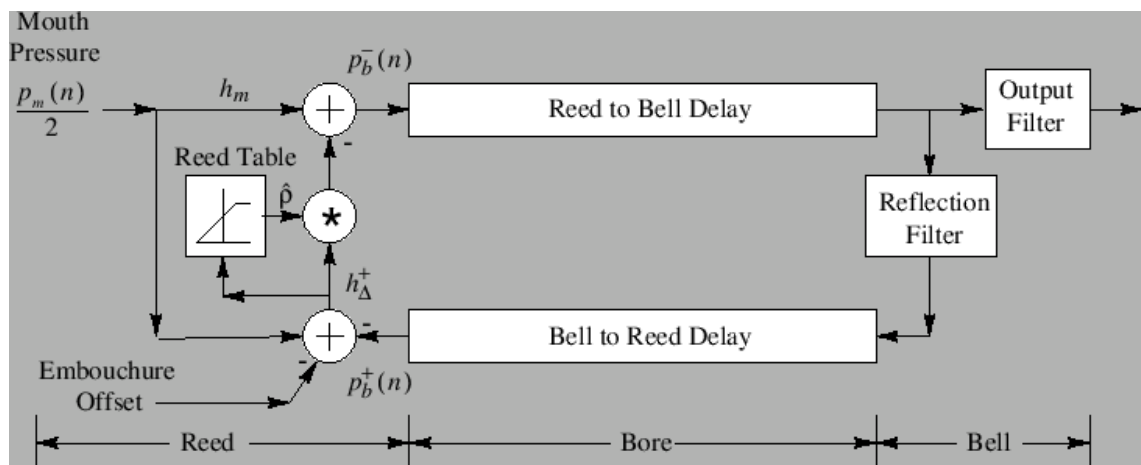


Abbildung 15 – Modell Klarinette aus [Smi10]

3.6 konische Holzblasinstrumente

Die folgenden Modelle für konische Holzblasinstrumente, wie etwa das Saxophon, wurden von Gary P. Scavone in [Sca02] beschrieben.

Rohrblatt an konischem Waveguide Um ein konisches Holzblasinstrument mit den hier entwickelten Methoden und Modellen zu simulieren, würde man annehmen, dass es genüge, das Modell für zylindrische Holzblasinstrumente mit dem konischen Waveguide zu erweitern. Wird das Rohrblattmodell jedoch direkt an einen konischen Waveguide angekoppelt, entsteht eine Rückkopplung ohne Zeitverzögerung. Dieses Modell ist also *instabil* und somit unbrauchbar.

Der Grund dieses Verhaltens ist, dass das Rohrblattmodell für die Ankopplung an einen zylindrischen Resonator mit einer reellen Wellenimpedanz hergeleitet wurde. Die Eingangsimpedanz R_o des konischen Waveguides stellt jedoch eine komplexe Wellenimpedanz mit Hochpassverhalten dar. Die Herleitung eines Rohrblattmodells für die Ankopplung an einen konischen Resonator ist nicht trivial. Somit werden die folgenden stabilen Modelle vorgeschlagen, die eine Ankopplung des bekannten Rohrblattmodells zur Simulation eines konischen Holzblasinstruments ermöglichen.

Cyclone Bei diesem Modell wird die Stabilität durch ein Zylinder-Zwischenstück, welches das Mundstückvolumen nachbildet, erreicht. In Abbildung 16 ist die geometrische Repräsentation und der Signalflussplan zu sehen.

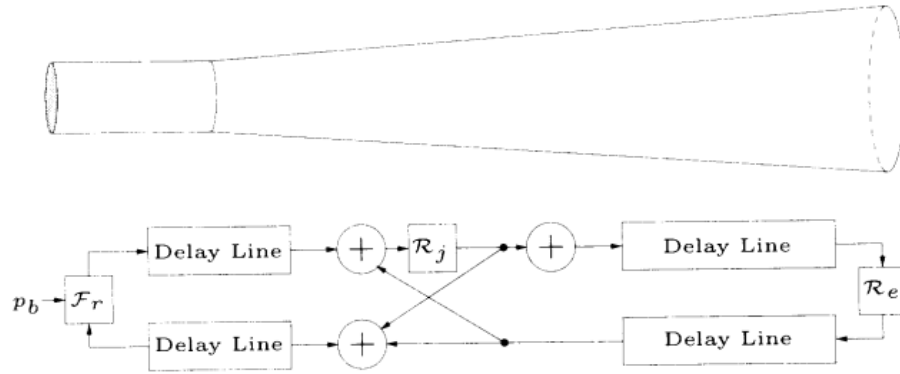


Abbildung 16 – Cyclone aus [Sca02]

\mathcal{F}_r bezeichnet hier das Rohrblattmodell. Es ist an den zylindrischen Waveguide der Länge $x_o/3$ angekoppelt. Zwischen zylindrischem und konischem Waveguide befindet sich ein vereinfachter „Streuungsknoten“ (siehe [Smi10, Kap. One-Multiply Scattering Junctions]). Der Übergangsfiter \mathcal{R}_j ist gegeben durch

$$\mathcal{R}_j^-(z) = \mathcal{R}_j^+(z) = -\frac{\gamma}{\alpha + \gamma} \left(\frac{1 + z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \right) \quad (39)$$

mit den Parametern

$$\gamma = \frac{c}{2x_o} \quad (40)$$

und

$$a_1 = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha + \gamma}, \quad (41)$$

der Schallgeschwindigkeit c und der Bilineartransformationskonstante α . Das Modell ist stabil, wenn keine Diskontinuität zwischen Zylinder und Konus simuliert wird. Das Modell ist mit dem Reflexionsfilter \mathcal{R}_e abgeschlossen.

Virtual Blowed String Dieses Modell ist in Abbildung 17 zu sehen. Angelehnt an die gestrichene Saite (bowed string), wird ein an beiden Enden offener Zylinder simuliert, der an einer beliebigen Stelle mit dem Rohrblattmodell angeregt wird. Dieses Modell entspricht keiner praktisch realisierbaren Anordnung, kann jedoch sehr effizient simuliert werden. Das Modell ist links mit einer idealen Impedanz von null und rechts mit einem Reflexionsfilter \mathcal{R}_e abgeschlossen.

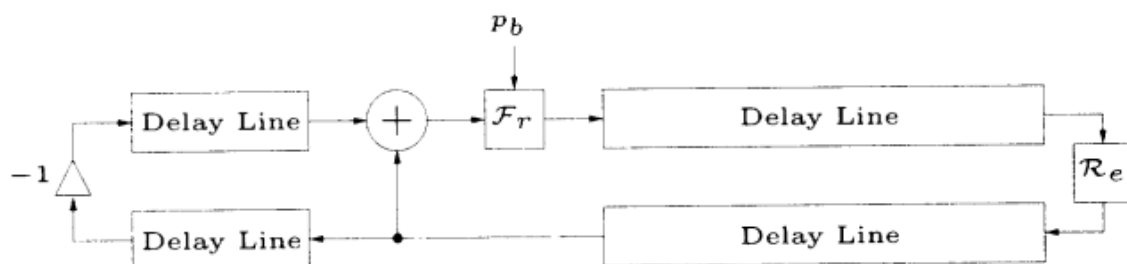


Abbildung 17 – Virtual Blowed String aus [Sca02]

4 Implementierung

In diesem Projekt wurden die vorgestellten Modelle für zylindrische und konische Holzblasinstrumente implementiert. Auf Grund der Effizienz von Waveguide-Modellen waren alle stabilen Modelle echtzeitfähig und spielbar. In diesem Abschnitt werden die Implementierungen vorgestellt und verglichen.

Das Klarinettenmodell aus Abschnitt 3.5 wurde implementiert und erweitert. Da das Rohrblattmodell auch für die konischen Holzblasinstrumentenmodelle unverändert nutzbar ist, konnten die stabilen Modelle aus Abschnitt 3.6 auch damit implementiert werden.

Allgemein erfolgte die Änderung der Tonhöhe durch die Länge der Bohrung und somit durch die Länge der Delay Lines im Waveguide. Das Abstrahlverhalten der Instrumente wurde nicht berücksichtigt, was gerade bei Holzblasinstrumenten sehr komplex sein kann. Somit gibt es pro Modell nur einen Ausgang, der dem Schalldruck am Schallbecher entspricht. Es wurde weder Festkörperschwingung berücksichtigt, noch gab es eine Modellierung des Vokaltrakts. Dem Munddrucksignal wurde Bandpass-gefiltertes weißes Rauschen mit einer Mittenfrequenz von 500Hz hinzugefügt, um die turbulente Luftströmung durch das Mundstück zu simulieren, die von den verwendeten Modellen nicht erfasst wird.

Die Implementierung⁵ erfolgte in der Programmiersprache Pure Data [IEM] mit den Bibliotheken *acre*⁶ [Rita] und *acre-wg*⁷ [Ritb] von Winfried Ritsch. In Abbildung 18 ist die GUI des Pd Patch zu sehen.

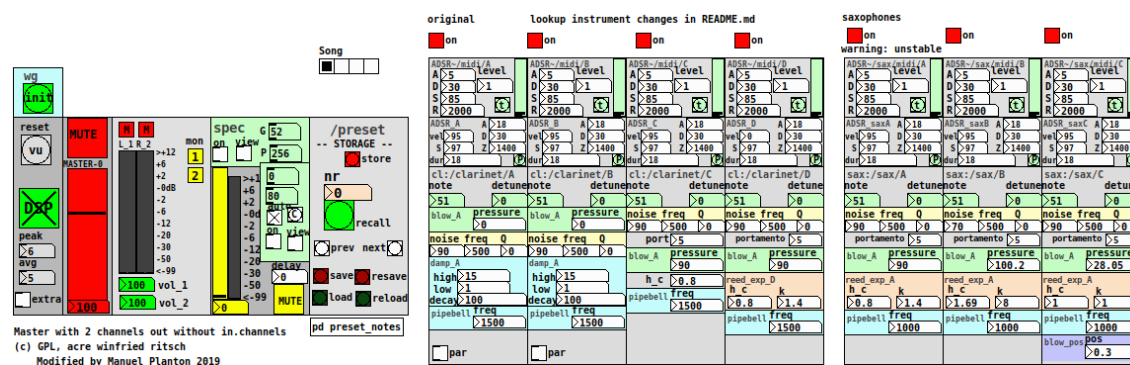


Abbildung 18 – GUI der Implementierungen

Die GUI ist wie ein Mischpult aufgebaut und im rechten Bereich befinden sich die unterschiedlichen implementierten Modelle als Channel Strips. Somit konnten die Modelle leicht miteinander verglichen werden. Die Evaluierung der Modelle erfolgte mittels MIDI-Input. So konnten die verschiedenen Modelle mit dem Abspielen von MIDI Dateien angesteuert werden, oder mittels MIDI-Keyboard bzw. EWI⁸ gespielt werden. Der

5. Das Repository befindet sich unter https://git.iem.at/s1061531/pm_sax und unterliegt der GPL (<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.de.html>).

6. Algorithmic Composition Real-time Environment library

7. acre-Waveguides library

8. Electronic Wind Instrument

Velocity-Wert wurde als Munddruck p_m verwendet und die MIDI Note Number bestimmte die Länge der Bohrung.

4.1 Klarinette

Das Klarinettenmodell wurde mit der Möglichkeit für Portamento und mit dem Exponenten k für $\hat{\rho}^k$ erweitert. Portamento vermeidet unmittelbare Frequenzsprünge beim Tonhöhenwechsel, was zum hörbaren Anregen des Waveguides führen kann. Der Exponent k führt mit höheren Werten zu einem helleren Klang und zu einer leichteren Ansprache, aber auch zu einem instabileren System und eventuell zum ungewollten Überblasen.

Mit den Parametern h_Δ^c , k und der Grenzfrequenz des Reflexions- und Ausgangsfilters konnte ein realistischer Klang und gute Ansprache⁹ erreicht werden.¹⁰ Gerade in der tiefen Lage war der Klarinettenklang überzeugend. Die Grenzfrequenz für das Tiefpassverhalten von Klarinetten liegt zwischen 1200Hz und 2000Hz [FR91, 407] und es wurde eine Grenzfrequenz von 1500Hz gewählt.

4.2 konische Modelle

Für alle konischen Modelle wurde eine Grenzfrequenz des Reflexions- und Ausgangsfilters von 1000Hz gewählt.

Rohrblatt an konischem Waveguide Aus Abschnitt 3.6 folgt, dass mit der direkten Ankopplung des Rohrblattmodells an ein zylindrisches Waveguide ein instabiles System entsteht. Dies konnte in diesem Projekt experimentell bestätigt werden.

Cyclone Das Cyclone Modell hat einen sehr schwierig einzustellenden Parameterraum und es konnte somit kein stabiler Klang eines konischen Holzblasinstrumentes nachgebildet werden. Es kam sehr schnell zum Überblasen in die Oktave und der Bereich zwischen der Möglichkeit einen Ton anzuspielen und der Selbstoszillation des Systems war sehr klein und konnte nicht einfach vergrößert werden, da alle Parameter das gesamte System beeinflussen.

Somit ist das Cyclone Modell in Bezug auf Klangqualität und Spielbarkeit kein zufriedenstellendes Modell, aber es demonstriert bereits die teilweise richtige Nachbildung physikalischen Verhaltens mittels Physical Modeling. Die Verwendung des konischen Waveguides führt zum Überblasen in die Oktave, wie es bei konischen Instrumenten der Fall ist und nicht in die Duodezime, wie es bei zylindrischen Instrumenten geschieht.

9. Mit Ansprache ist hier die Ansprache eines auf einem Holzblasinstrument gespielten Tons gemeint. Eine leichte Ansprache führt zu einem kürzeren Einschwingverhalten, als eine schwere Ansprache.

10. Die Bewertung geschah in einem nicht formalen Hörversuch; mittels Vergleich beim Spielen des Modells (gespielt mit einem EWI) mit dem Spielen eines Saxophons.

Virtual Blowed String Das Virtual Blowed String Modell mit einer „Anblasposition“ bei einem Drittel der Rohrlänge konnte einen saxophonähnlichen stabilen Klang erzeugen und zeigte eine gute Ansprache. Mit verschiedenen „Anblaspositionen“ können verschiedene Klänge produziert werden, die keinem traditionellen Instrument entsprechen. Das System zeigte stabiles Verhalten mit einem gut kontrollierbaren Parameterraum. Die Spielbarkeit war aufgrund der Ansprache und Stabilität gut, jedoch war die Nachbildung des Klangs nicht so überzeugend, wie bei dem Klarinettenmodell.

5 Fazit

In dieser Arbeit wurden aktuelle Physical Modeling Methoden für die Echtzeitsimulation von zylindrischen und konischen Holzblasinstrumenten zur Klangsynthese vorgestellt. Die Modelle basieren auf *Waveguides* mit einem Rohrblattmodell, welches als zentraler Anregungsmechanismus effizient berechnet werden kann. Somit ist Klangsynthese in Echtzeit und damit ein direkter Vergleich beim Spielen der Modelle möglich. Die vorgestellten Modelle konnten in Pd implementiert und klanglich in einem nicht formalen Hörversuch evaluiert werden. Weiters wurde auch Wert auf die Spielbarkeit der verschiedenen Modelle gelegt.

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass die Modellierung von zylindrischen Holzblasinstrumenten wie der Klarinette mit Waveguide-Modellen klanglich und spielbar überzeugende Resultate liefert. Die Modellierung von konischen Holzblasinstrumenten wie dem Saxophon ist noch verbesserungsfähig. Es ergeben sich Stabilitätsprobleme aus der direkten Kombination von konischen Waveguides mit dem Rohrblattmodell, welches für zylindrische Bohrungen entwickelt wurde. Die Herleitung des Rohrblattmodells für konische Bohrungen ist nicht trivial und führt zur Verwendung dieses Modells in dafür konstruierten oder physikalisch nicht entsprechenden Modellen.

Klanglich und spielerisch stellte sich das Virtual Blowed String Modell als bestes konisches Modell heraus, welches physikalisch nicht einem konischen Holzblasinstrument entspricht. Die klangliche Nachbildung eines realen konischen Instruments ist mit diesem Modell nicht überzeugend und bietet somit Verbesserungspotential.

Eine Verbesserung der Modelle könnte mittels genauerer Modellierung der *Tonlöcher* [Smi10, Kap. Tonehole Modeling] und *Schallbecher* [CK16, 336 ff.] erreicht werden. Weiters könnte noch die Schallabstrahlung berücksichtigt werden. In Kombination mit einem raumakustischen Modell, könnte dies zu einem verbesserten Klangeindruck führen.

Zur Synthese von klanglich hochwertigen Saxophon-Klängen werden aktuell Sample basierte Verfahren wie *Concatenative Synthesis* [MHRP06] und spektrale Verfahren, die auf dem *Sinusoidal plus Residual Model* basieren [Haa01] verwendet. Denkbar ist eine Hybridform eines Saxophonsynthesizers, der die natürliche Spielbarkeit eines physikalischen Modells mit der Klangqualität von Sample basierten bzw. spektralen Verfahren vereint.

Literatur

- [CK16] A. Chaigne and J. Kergomard, *Acoustics of Musical Instruments*. Springer, 2016.
- [FR91] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*. Springer, 1991.
- [Haa01] J. Haas, “Salto: A spectral domain saxophone synthesizer,” in *Proceedings of the Mosart Workshop*, 2001.
- [IEM] “Pure data,” <https://puredata.info>, IEM (<http://iem.at/>) - Institute of Electronic Music and Acoustics, accessed: 2020-04-14.
- [MHRP06] E. Maestre, A. Hazan, R. Ramirez, and A. Perez, “Using concatenative synthesis for expressive performance in jazz saxophone,” in *International Computer Music Conference Proceedings*, vol. 2006. International Computer Music Association, 2006, permalink: <http://hdl.handle.net/2027/spo.bbp2372.2006.037>.
- [OS14] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Pearson, 2014, pearson New International Edition.
- [Rita] W. Ritsch, “Algorithmic composition realtime environment: acre repository,” <https://git.iem.at/pd/acre>, accessed: 2020-04-14.
- [Ritb] —, “Waveguide library: acre-wg repository,” <https://git.iem.at/pd/acre-wg>, accessed: 2020-04-14.
- [Sca97] G. P. Scavone, “An acoustic analysis of single-reed woodwind instruments with an emphasis on design and performance issues and digital waveguide modeling techniques,” PhD Thesis, Stanford University, 1997.
- [Sca02] —, “Time-domain synthesis of conical bore instrument sounds,” in *International Computer Music Conference Proceedings*, vol. 2002. International Computer Music Association, 2002, permalink: <http://hdl.handle.net/2027/spo.bbp2372.2002.003>.
- [Smi86] J. O. Smith, “Efficient simulation of the reed-bore and bow-string mechanisms,” in *International Computer Music Conference Proceedings*, vol. 1986. International Computer Music Association, 1986, permalink: <http://hdl.handle.net/2027/spo.bbp2372.1986.054>.
- [Smi10] —, *Physical Audio Signal Processing*. <https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>, 2010, online book, 2010 edition, accessed: 2020-04-07.
- [Wei] E. W. Weisstein, “"d’alembert’s solution."from mathworld—a wolfram web resource.” <https://mathworld.wolfram.com/dAlembertsSolution.html>, accessed: 2020-04-14.