#### **Bachelorarbeit**

im Studiengang Audiovisuelle Medien

# Physical Modelling als Klangsynthesestrategie

Vorgelegt von Nils Haala (Matrikelnummer 29967) an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 31. Dezember 2018

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell

# Ehrenwörtliche Versicherung

"Hiermit versichere ich, Nils Haala, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: "Physical Modelling als Klangsynthesestrategie" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen."

Stuttgart, den 31. Dezember 2018	
, and the second	Nils Haala

## Kurzfassung

Diese Abschlussarbeit befasst sich mit der Technologie des Physical Modelling als digitale Klangsynthesestrategie. Zunächst wird ein Überblick über relevante, digitale Klangsynthesestrategien und ihre Eignung zur Simulation von Musikinstrumenten präsentiert. Darauf folgt eine umfassende Heranführung an das Themengebiet des Physical Modelling, wobei zunächst grundlegende Prinzipen der physikalischen Modellierung von Musikinstrumenten erklärt werden. Einen großen Teil umfasst anschließend die Erläuterung der verschiedenen Paradigmen zur Erstellung solcher Instrumentenmodelle. Abschließend wird der aktuelle Status der Klangsynthesestrategie betrachtet.

#### **Abstract**

This thesis deals with digital sound synthesis by physical modelling. Initially, an overview of relevant digital sound synthesis methods and their suitability for simulating musical instruments is presented. Following this, the reader gets a comprehensive introduction to physical modelling of musical instruments. For this, the basic principles to physical modelling are introduced, following an exemplary explanation of the commonly used paradigms. Subsequently, the current state of digital sound synthesis using physical models is discussed.

# Inhalt

1.	Einle	itung	1
2.	Digit	ale Klangsynthesestrategien und ihre Eignung zur Modellierung von Musikinstrumenten	3
2.1	1.	Spektrale Modelle	5
2.2	2.	Abstrakte Algorithmen	9
2.3	3.	Klangoptimierte Aufnahmen	12
2.4	4.	Fazit	14
3.	Phys	ical Modelling: Grundlagen	16
3.1	1.	Einführung	16
3.2	2.	Aufbau eines Instrumentenmodells	20
3.3	3.	Anregung	22
3.4	4.	Partielle Differenzialgleichungen	23
4.	Para	digmen der Erstellung physikalischer Modelle	27
4.1	1.	Finite-Differenzen-Methoden	27
4.2	2.	Masse-Feder-Netzwerke	33
4.3	3.	Modalsynthese	38
4.4	4.	Source-Filter-Modelle	41
4.5	5.	Digitale Wellenleiter	42
4.6	<b>5</b> .	Sonstige	49
4.7	7.	Fazit	50
5.	Statı	JS	52
5.1	1.	Kommerzielle Anwendung	52
5.2	2.	Forschungstrends	53
5.3	3.	Exkurs: Steuerung	54
6.	Fazit		55
Symb	olve	rzeichnis	A
Abbil	dun	gsverzeichnis	В
Litera	aturv	erzeichnis	$\overline{C}$

# 1. Einleitung

Im Bereich der digitalen Klangsynthese spielt die Simulation von Musikinstrumenten eine stetig wachsende, wichtige Rolle. Wissenschaftler, Tontechniker oder Künstler sind angetrieben vom Bestreben, den Klang realer Musikinstrumente mithilfe unterschiedlichster Techniken zu synthetisieren. Fokus und Zielsetzung dieser Simulationen liegen vor allem auf dem Erzielen einer möglichst authentischen, realistischen Nachbildung eines Instrumentenklangs in effizienter und gut modifizierbarer Form. So soll es unter anderem für Musikproduzenten möglich gemacht werden, mithilfe eines Computerprogramms den möglichst originalgetreuen Klang eines Instruments wie bspw. Altsaxophon, Konzertflügel, Westerngitarre usw. in Echtzeit zu erzeugen. Dadurch kann etwa der immense zeitliche und finanzielle Aufwand von Engagement und Aufnahme externer Musiker, oder gar der Beschaffung des jeweiligen Instruments umgangen werden. Innerhalb dieser Simulationen soll das virtuelle Instrument möglichst intuitiv und einfach zu bedienen sein, sodass es ohne große Einarbeitung oder Vorwissen für Musikproduzenten oder Künstler spiel- oder "programmierbar" ist.

Das zurzeit meistgenutzte Verfahren zur Schaffung solcher virtuellen Instrumente nutzt die Sampling-Technologie. Dabei wird der ganzheitliche Klang eines realen Instruments durch die Wiedergabe dessen zuvor aufgezeichneter Einzeltönen simuliert. Um hier ein möglichst genaues und realistisch klingendes Ergebnis zu erzielen, ist allerdings, wie später genauer beschrieben, ein teilweise immenser Aufwand in der Aufnahme und Nachbearbeitung der Einzeltöne nötig. Dadurch stößt dieses Verfahren vor allem für bestimmte Instrumentengruppen an seine Grenzen. Auch die schlechte Modifizierbarkeit der Klangcharakteristik der Instrumentensimulationen macht diese Technik oftmals unattraktiv.

Einen anderen, besonders vielversprechenden Ansatz in der Erstellung virtueller Instrumente bietet dabei die Klangsynthesestrategie des *Physical Modelling (PM)*: Diese Synthesetechnik basiert auf physikalischen Modellen, welche auf Grundlage physikalischer Gesetze und Beschreibungen die klangformenden Teile und Prozesse eines Instruments modellieren. Anhand dessen kann schließlich der ganzheitliche Klang des Instruments synthetisiert werden. In der Theorie kann dabei also jede noch so kleine, klangbeeinflussende Gegebenheit in den Modellen implementiert und somit hör- und modifizierbar gemacht werden. Trotz dieses vielversprechenden Grundsatzes kann die PM-Synthese die Sampling Synthese (noch) nicht als meistgenutzte Klangsynthesestrategie in der Simulation realer Musikinstrumente verdrängen.

Die physikalische Modellierung als digitale Klangsynthesestrategie kann im weiten Sinne als breiter Themenkomplex wahrgenommen werden. Der Begriff "Physical Modelling" umfasst, wie später beschrieben, unter anderem auch die physikalische Modellierung von Musikinstrumenten zu Forschungszwecken im Hinblick auf Optimierungen im Instrumentenbau, die Simulation elektrischer

Schaltungen musikalischer Geräte wie Effektpedale oder Gitarrenverstärker sowie die experimentell orientierte Schaffung neuer Klangcharakteristiken auf Basis der PM-Synthese.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Physical Modelling als Klangsynthesestrategie zur Simulation realer, größtenteils akustischer Musikinstrumente unter dem Ziel, deren Klang möglichst in Echtzeit zu synthetisieren. Besonderen Wert wird auf eine Heranführung an die verschiedenen möglichen Paradigmen zur Erstellung solcher physikalischen Modelle gelegt. Der Leser soll somit in der Lage sein, die prinzipiellen Herangehensweisen in der Erstellung physikalischer Modelle nachzuvollziehen und dabei ihre Vor- und Nachteile, Limitierungen und Möglichkeiten zu erkennen. Auf Grundlage dessen kann so unter Anbetracht der aktuellen Marktsituation, Forschungstrends und Problemfelder von Physical Modelling eine Einschätzung über deren aktuellen Status und zu erwartende Entwicklungen gegeben werden. Die Klangsynthesestrategie wird hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen bewertet.

In Kapitel 2 soll zunächst ein allgemeiner Überblick über einige Arten der digitalen Klangsynthese und ihre jeweilige Eignung zur Modellierung realer Musikinstrumente geschaffen werden. Es folgt die Betrachtung der PM-Synthese. Zunächst wird in Kapitel 3 einführend eine Grundlage für ein Verständnis durch Erläuterung grundsätzlich wichtiger Themenkomplexe des Physical Modelling geschaffen. Anschließend werden in Kapitel 4 die im Physical Modelling verwendeten Paradigmen zur Erstellung physikalischer Modelle vorgestellt. Dabei sollen dem Leser die Grundlagen durch verständliche Erläuterungen anhand grundlegender Beispiele vermittelt werden, um so ein Verständnis für komplexere, in relevanten Simulationen verwendete Modelle zu entwickeln. Kapitel 5 widmet sich schließlich der Betrachtung des Status der Klangsynthesestrategie. Abgeschlossen wird die Arbeit durch ein Fazit.

# 2. Digitale Klangsynthesestrategien und ihre Eignung zur Modellierung von Musikinstrumenten

Um sich zunächst einen Überblick zu verschaffen, sollen in diesem Kapitel einige abseits der PM-Synthese relevanten Arten der digitalen Klangsynthese in ihrer Funktionsweise erklärt und auf ihre Eignung zur Modellierung realer Musikinstrumente geprüft werden.

Hierfür lohnt es sich, zunächst einige Anforderung einer Klangsynthesestrategie bzgl. der Instrumentensimulation zu formulieren:

- An erster Stelle steht dabei natürlich die Möglichkeit der realistischen und authentischen Nachbildung des Klangs des zu modellierenden Instruments, sodass im optimalen Fall kein klanglicher Unterschied zwischen Modell und Original für den Hörer erkennbar ist. Allgemein gilt es hierbei zu berücksichtigen, dass sich möglicherweise große Unterschiede in der Genauigkeit Abbildung zwischen den verschiedenen unterschiedlichen der Instrumentengruppen auftun können. Da die nachzubildenden Musikinstrumente sich bereits in ihrer Art der Tonerzeugung und Klangcharakteristik sehr unterscheiden, gibt es also möglicherweise Strategien, welche den Klang einer bestimmten Instrumentengruppe oder eines Instruments besonders gut abbilden können, für andere Instrumentenarten jedoch völlig ungeeignet sind. Gleichzeitig kann womöglich ein anderes Synthesemodell eine große Bandbreite an Instrumentengruppen abdecken, jedoch keins dieser Instrumente besonders akkurat simulieren.
- Um eine gute Modifizierbarkeit zu gewährleisten, sollte das Modell eine große Anzahl klangformender Parameter vorweisen, deren Veränderung zu einer für den Nutzer nachvollziehbaren, intuitiven und verständlichen Umformung des Klangs führt.
- Das Synthesemodell sollte im Hinblick die Laufzeit in seinem rechnerischen Aufwand so effizient gehalten sein, dass eine Implementierung in Form einer in Echtzeit "spielbaren" Instrumentensimulation möglich ist. Des Weiteren ist es von Vorteil, den betriebenen Aufwand in einem Rahmen zu halten, welcher die Entwicklung eines möglichst kostengünstigen und so auch für den "Consumer-Bereich" (also Heim-, Amateur- und Semiprofessionelle Tonstudios) erschwinglichen Produkts ermöglicht.

Eine Kategorisierung der unterschiedlichen Synthesetechniken in Bezug auf musikalische Klangsynthese kann auf verschiedene Weisen vorgenommen werden. Ein oft genutztes Modell liefert u.a. Serra (Serra 1997), welcher eine Einteilung in drei Basismodelle vornimmt: *Instrumentenmodelle, Spektrale Modelle* und *Abstrakte Modelle*. Die *Instrumentenmodelle* parametrisieren dabei den Klang an der Quelle, in unserem Falle dem Musikinstrument. *Spektrale Modelle* hingegen nehmen die Parametrisierung an der Senke, dem Gehör, vor. So kann unter anderem jegliches Spektrum, welches unser Gehör nicht

wahrnimmt, vernachlässigt werden. *Abstrakte Modelle* sind darauf ausgelegt, vor allem musikalisch nützliche Parameter innerhalb einer abstrakten (also nicht oder kaum in direkter Verbindung zu jeglichen am realen Instrument physisch vorhandenen Parameter stehenden) Formel bereitzustellen.

Eine weitere sinnvolle Einteilung zur ganzheitlichen Erfassung der aktuell bekanntesten Klangsynthesearten, nach der sich auch diese Arbeit orientiert, nimmt unter anderem Tolonen in (Tolonen et al. 1998) vor. Er unterscheidet dabei zwischen den Klassen der klangoptimierten Aufnahmen, spektralen Modelle, physikalischen Modelle und abstrakten Algorithmen.

Im Folgenden sollen nun zunächst zwei spektrale Modelle in Form der *subtraktiven* und der *additiven Klangsynthese* beschrieben werden. Anschließend werden mit der *FM-Synthese* und dem *Karplus-Strong Algorithmus* zwei relevante Modelle der abstrakten Algorithmen erklärt. Zuletzt wird mit dem *Sampling* auf die Klasse der klangoptimierten Aufnahmen eingegangen.

Anschließend widmen sich Kapitel 3 und 4 einer ausführlichen Erläuterung der *physikalischen Modelle*. Kapitel 2 soll keine allumfassende Beschreibung jeglicher Klangsynthesestrategien darstellen, sondern lediglich einen groben Einblick in die für die Simulation von realen Musikinstrumenten in weitem Sinne relevanten Techniken liefern. So werden etwaige populäre Arten der digitalen Klangsynthese wie etwa die *Granularsynthese* oder *Synthese durch Amplitudenmodulation (AM-Synthese*) aufgrund geringer Relevanz oder großer Ähnlichkeit zu anderen Techniken vernachlässigt, um den Umfang des Kapitels in Grenzen zu halten.

#### 2.1. Spektrale Modelle

#### 2.1.1. Subtraktive Synthese

Bei der subtraktiven Synthese (oder Source-Filter-Synthese) wird eine meist von einem Oszillator generierte Wellenform durch klangverändernde Module wie Filter, Hüllkurven-Generatoren oder Verstärkermodule zu einem gewünschten Klang geformt. Als Ausgangssignal nutzt man dabei meist ein breitbandiges oder obertonreiches Erregersignal, etwa weißes Rauschen oder jegliche periodische Schwingung wie bspw. Rechteck- oder Sägezahnsignal. Die Technik ist vor allem mit zeitvarianten Filtern besonders mächtig. Abbildung 1 zeigt vereinfacht das Prinzip der subtraktiven Synthese, wobei ein breitbandiges Erregersignal mittels eines Filters zum gewünschten Ausgangssignal geformt wird.

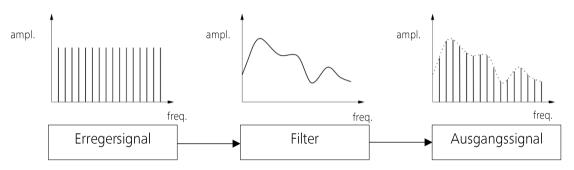


Abbildung 1: Subtraktive Synthese nach (Stefan Bilbao 2007, S. 6)

In Hinblick auf die Simulation realer Musikinstrumente gelangt man dabei durch die einfache und intuitive Modifizierbarkeit des Ausgangssignals klanglich relativ schnell zumindest in die Nähe der Charakteristik eines bestimmten Instruments. Ferner wurde die subtraktive Synthese bspw. von Moorer (Moorer 1985) genutzt, um Sprache zu synthetisieren, Roads (Roads 1996, S. 18) nutzte sie für Musikanwendungen.

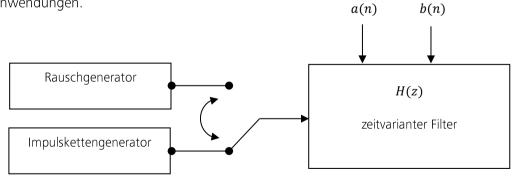


Abbildung 2: Signalflussdiagramm eines Source-Filter-Modells zur Stimmsynthese nach (T. Tolonen et al., S. 22)

Tolonen liefert in (Tolonen et al. 1998) eine beispielhafte Beschreibung für die Modellierung der menschlichen Stimme mithilfe der Source-Filter-Synthese: Die Stimme wird hierbei, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, durch einen Erregermechanismus, gekoppelt an ein Resonatorsystem in Form eines zeitvarianten Filters modelliert. Bei der Synthese von Sprachlauten wird anfangs von der Signalquelle weißes Rauschen für stimmhafte, oder eine Impulskette für die stimmlosen Laute generiert. Der Filter H(z) modelliert dabei die Resonanzeigenschaften des Vokaltraktes, sodass das Ausgangssignal zu einem sprachähnlichen Klang "geformt" wird. Die zeitvarianten Filterkoeffizienten a(n) und b(n) ahmen durch Variation die klangformenden Bewegungen des Vokaltraktes wie Lippenoder Zungenbewegungen nach. Generell können auch viele traditionelle Instrumente, welche ein zeitinvariantes oder nur langsam veränderliches Resonanzsystem besitzen, über die subtraktive Synthese grob dargestellt werden.

Festzuhalten bleibt, dass die Ergebnisse bisheriger Versuche mittels der subtraktiven Synthese Naturinstrumente zu simulieren zwar schnell zu einem dem Instrument ähnelndem Klangergebnis führten, dabei jedoch stets als unnatürlich, künstlich, starr und "steril" wahrgenommen wurden. Diese Art der Klangästhetik fand zwar Einzug in diversen Synthesizern (und konnte dabei die Vorlieben innerhalb bestimmter Genres elektronischer Musik bedienen), eignet sich aber nicht zu einer akkuraten Abbildung eines Instrumentenklangs. Von daher kann die subtraktive Synthese in ihrer "klassischen" Form als eher ungeeignet für die realistisch klingende Simulation von Musikinstrumenten betrachtet werden. Eine Interpretation von Source-Filter-Modellen als physikalische Modelle wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

#### 2.1.2. Additive Synthese

Das Grundprinzip der additiven Synthese basiert auf den Erkenntnissen des französischen Mathematikers Jean-Baptiste Fourier (1768-1830). Dieser fand heraus, dass sich jeder periodische Vorgang (also auch jede periodische Schwingung) als Summe von sinusoidalen Grundschwingungen unterschiedlicher Frequenzen darstellen lässt. Die Fourier-Entwicklung ist dabei die mathematische Methode, die periodischen Vorgänge in ihre elementaren Grundschwingungen zu zerlegen.

In Bezug auf Klang und Klangnachahmung realer Musikinstrumente ist also davon auszugehen, dass jeder periodische Ton eines Instruments prinzipiell aus einer Anzahl diskreter sinus- oder kosinusförmigen Schwingungen besteht, welche jeweils bestimmte Frequenzen und zeitliche Amplitudenverläufe besitzen. Das heißt: Um einen Naturton nachzubilden, werden lediglich eine bestimmt Anzahl an Sinusoszillatoren sowie eine entsprechend große Anzahl an Hüllkurvengeneratoren zur Steuerung der jeweiligen Amplitudenverläufe benötigt (vgl. Hagenow 2001a, S. 14). In der Theorie kann also eine entsprechend große Anzahl an Sinusoszillatoren, deren Frequenz, Amplitude und Phase jeweils einzeln steuerbar sind, jede erdenkliche Wellenform generieren und somit auch den Klang von Musikinstrumenten erzeugen. In der Praxis ist dies natürlich nur bis zu einem bestimmten Grad möglich. Bei vertretbarem Arbeitsaufwand können nur eine beschränkte Anzahl an Teilschwingungen auf diese Weise generiert und somit Klänge zu synthetisiert werden.

Zur Klangsynthese werden drei Kontrollfunktionen für jeden Sinusoszillator benötigt: Amplitude, Frequenz und Phase, wobei zur Vereinfachung des Algorithmus häufig auf die Steuerung der Phase verzichtet wird.

Das Ausgangssignal y(t) wird bei der additiven Klangsynthese wie folgt dargestellt:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{M-1} A_k(t) * \sin[2\pi * f_k(t)]$$
 (7)

Dabei ist M die Gesamtanzahl der Sinusoszillatoren,  $A_k(t)$  die hüllkurvengesteuerte, zeitabhängige Amplitude der k-ten Teilschwingung und  $f_k(t)$  die (veränderliche) Frequenz der k-ten Teilschwingung.

Die Kontrollfunktionen eines nachzubildenden Signals können durch Anwendung der Fourier-Transformation errechnet werden. Auf Grundlage dessen kann der Klang nun wiederrum beliebig (re)synthetisieret werden. Nach diesem Prinzip muss jedoch jeder Synthese eine Analyse des zu modellierenden Signals vorangehen. Dies erschwert eine Klangsynthese in Echtzeit ab einem bestimmten Komplexitätsgrad der nachzubildenden Signale aufgrund der hohen benötigten Rechenleistung enorm.

Eine Methode zur Reduzierung von Datenmenge und damit verbundener Rechenleistung ist die *Line-Segment Approximation (Roads 1996, S. 149; Moorer 1985)*. Dabei werden Amplituden- und Frequenzfunktionen durch stückweise lineare Kurven gesteuert, um den durch eine vorherige Klanganalyse bestimmten Originalverlauf der Obertonamplitude der nachzubildenden Klänge zu approximieren (Hagenow 2001b, S. 14). Es wird besonderen Wert daraufgelegt, die Kontrolldaten für den Nutzer in einer möglichst intuitiven und im musikalischen Sinne sinnvollen Form zu halten und natürlich den ursprünglichen Klang möglichst wenig zu verfälschen. Abbildung 3 zeigt am Beispiel des Hüllkurvenverlaufs eines Obertons, wie durch den Einsatz linearer Kurvensegmente, die dem ursprünglichen Verlauf der Verlaufskurve möglichst nahekommen, der Kurvenverlauf approximiert wird.

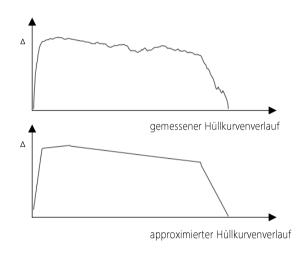


Abbildung 3: Line-Segment Approximation der Hüllkurve eines Obertons nach (T. Tolonen et al., S. 20)

Die größten Nachteile der additiven Synthese sind die enorme Datenmenge und die hohe Anzahl der benötigten Oszillatoren bei komplexeren Signalen. Die Syntheseart erzielt daher bei harmonischen oder nahezu harmonischen Signalen mit keinem oder geringem Rauschanteil die besten Ergebnisse, da hier vergleichsweise wenig Oszillatoren benötigt werden, um den Klang darzustellen. Die Implementierungsarbeit der Synthesetechnik erhöht sich mit der Komplexität und somit Lebhaftigkeit und Dynamik des zu simulierenden Klangs. Besonders obertonreiche Signale erfordern eine hohe Anzahl an Oszillatoren und Modulatoren. Daher ist die additive Synthese lediglich zur Simulation solcher Instrumente geeignet, welche, wie oben genannt, möglichst harmonische Signale mit geringem Transienten- und "Noise"-Anteil erzeugen.

#### 2.2. Abstrakte Algorithmen

#### 2.2.1. Synthese durch Frequenzmodulation

Die Synthese durch Frequenzmodulation (FM-Synthese) besteht in ihrer ursprünglichsten Form aus zwei (sinusförmigen) Oszillatoren, dem Träger und dem Modulator. Dabei wird die Frequenz des Trägersignals durch die Schwingung des Modulators moduliert.

Die Technik der Frequenzmodulation wurde ursprünglich im Rundfunk verwendet. Erstmals untersuchte John Chowing, siehe (Chowning 1973) die FM-Synthese als Mittel zur Klangerzeugung. Während die zeitveränderlichen Strukturen von Naturklängen mit linearen Techniken (siehe 2.1.2) nur schwer nachzuahmen sind, entdeckte Chowning die Möglichkeiten der Erzeugung komplexer Audiospektren mithilfe von nur zwei Sinusoszillatoren. Mithilfe des simplen Prinzips war es möglich, mit einem Minimum an Rechenleistung in Echtzeit eine enorme Menge an unterschiedlichsten obertonreichen Signalen zu erzeugen. Die Technik stellte damals einen Meilenstein der digitalen Klangsynthese dar und wurde in vielen Synthesizern zur Klangerzeugung verwendet.

Das Ausganssignal y(t) wird bei der FM-Synthese durch die Gleichung

$$y(t) = A(t) * \sin[2\pi * f_c + I(t) * \sin(2\pi * f_m * t)]$$
(2)

beschrieben, wobei A(t) die Amplitude,  $f_c$  die Frequenz des Trägersignals, I(t) den Modulationsindex (bestimmt die Tiefe der Modulation) und  $f_m$  die Frequenz der Modulationsschwingung beschreibt.

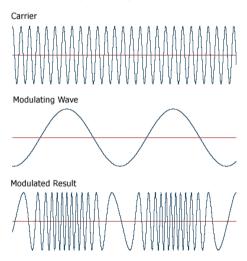


Abbildung 4:: Träger- und Modulationsschwingung, resultierende Schwingung. Quelle: https://www.computerlanguage.com/results.php?definition=frequency+modulation

Ein harmonisches Spektrum erhält man, wenn Träger- und Modulatorfrequenz im Verhältnis ganzer Zahlen zueinanderstehen. Andernfalls ist das Ausgangssignal disharmonisch, was sich unter anderem auch zur Formung von unharmonischen Klangspektren (Glocken, Gongs, Schlagzeug) nutzen lässt (Hagenow 2001a, S. 10). Aufgrund des deutlich andersartigen Prinzips der Klangformung lassen sich bei der FM-Synthese allerdings nur schwer in Bezug auf ein zu simulierendes, reales Musikinstrument sinnvolle Parameter modellieren. Außerdem können schon sehr kleine Schwankungen der verfügbaren

Parameter eine große klangliche Veränderung des Ausgangssignals nach sich ziehen. So lädt diese Synthesetechnik eher zum Experimentieren und Erforschen neuer Klangästhetiken ein, eine gezielte und akkurate Simulation akustischer Musikinstrumente ist eher schwer möglich.

#### 2.2.2. Karplus-Strong-Algorithmus

Bei dem Karplus-Strong Algorithmus (KS-Algorithmus) handelt es sich um einen 1983 von Kevin Karplus und Alex Strong in (Karplus und Strong 1983) vorgestellten Algorithmus, welcher mit wenig Aufwand erstaunlich gute Ergebnisse in der Nachbildung des Klanges von Saiteninstrumenten liefert. Dabei handelt es sich im Prinzip um eine Abwandlung der *Wavetable-Synthese*<sup>1</sup>: Das im Wavetable abgelegte Soundsignal wird periodisch ausgelesen und mit jedem Durchlauf verändert - es handelt sich um eine "sich selbst modifizierende Wavetable-Synthese".

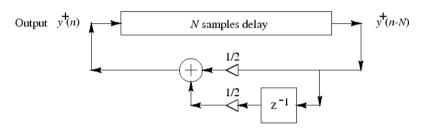


Abbildung 5: Signalverarbeitung beim Karplus-Strong Algorithmus Quelle: https://ccrma.stanford.edu/~jos/Mohonk05/Karplus\_Strong\_Algorithm.html

Die einfachste Form dieser "Selbst-Modifikation" ist, wie sie im ursprünglichen Karplus-Strong-Algorithmus auftritt, in Abbildung 5 dargestellt. Es wird nach dem Auslesen des aktuellen Samples aus dem N Samples haltenden Wavetable in einem sog. Schleifenfilter (engl. loop filter) der Mittelwert aus dem jeweils aktuellen und dem vorhergegangenen Sample gebildet. Anschließend wird das neu gebildete Sample (als modifizierte Version seiner selbst) wieder in den Speicher an den Anfang der Verzögerungskette abgelegt. Der Filter wirkt dabei als Tiefpassfilter, was die Abklingcharakteristik einer realen Saite mit der stärkeren Dämpfung von hohen Frequenzen simuliert. Das Ganze geschieht mit einer bestimmten Rate von R Samples pro Sekunde. Aufgrund eines psychoakustischen Phänomens, dem "Periodity Pitch" nimmt man das Ausgangssignal als Ton mit der Tonhöhe  $\frac{R}{N}$  Hz war. Die Tonhöhe kann durch die Menge der pro Zeiteinheit ausgelesenen Samples verändert werden. Die Klangfarbe des erzeugten Tons hängt von der Art der im Wavetable (den N Samples großen Speicher) abgelegten Samples ab. Bei der Entwicklung des Algorithmus erwies es sich als am zielführendsten, den Wavetable

10

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Bei der Wavetable-Synthese werden einzelne Wellenformen in digitale Wellenformtabellen (Wavetables) abgelegt und ausgelesen. Unterschiedliche Tonhöhen werden durch Variation der Auslesegeschwindigkeit erzeugt.

anfangs mit einer Sequenz zufälliger Geräusche zu initialisieren (z.B. weißes Rauschen).<sup>2</sup> Die Klangcharakteristik des erzeugten Tons erinnert dann stark an die einer gezupften Saite. Der Algorithmus wird daher von Karplus und Strong als *Plucked-String Algorithmus* beschreiben.

Beim KS-Algorithmus handelt es sich nach Tolonen (vgl.Tolonen et al. 1998, S. 10) im Grunde um einen Kammfilter. Dies wird deutlich, wenn man die Impulsantwort des Algorithmus näher betrachtet, wobei der Wavetable mit einem einzigen Impuls initialisiert wird.

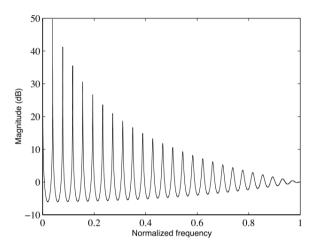


Abbildung 6: Impulsantwort des Karplus-Strong Algorithmus. Quelle: (T. Tolonen et al., S. 11)

Erweiterungen und Verbesserungen des Algorithmus werden in (Smith, III und Jaffe 1983) beschrieben, wobei der Karplus-Strong Algorithmus dabei als physikalisches Modell interpretiert wird (siehe 4.4). Des Weiteren wird in der Arbeit von Karplus und Strong auch ein dem Plucked-String-Algorithmus ähnliches Modell zur Simulation von perkussiven Instrumenten vorgestellt. Größere Relevanz und Bekanntheit erlangte aber vor allem das Saitenmodell.

11

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bei der "klassischen" Wavetable-Synthese in Bezug auf die Simulation von Instrumenten wird an dieser Stelle meist ein zuvor aufgenommener Ton eines Instruments abgelegt.

#### 2.3. Klangoptimierte Aufnahmen

#### 2.3.1. Sampling

Beim Sampling werden zuvor aufgenommene Signale (diese werden in diesem Zusammenhang ebenfalls als Samples bezeichnet) aus einem Speicher gelesen und abgespielt. Die Möglichkeiten in der Art dieser Samples sind prinzipiell sehr groß. Es kann sich hier um jeglichen, von einem Instrument oder sonstigen mechanischen oder elektrischen System akustisch oder elektronisch erzeugten Klang handeln. Im Bereich der Erstellung virtueller Instrumente nutzt man meist die Einzeltöne des jeweiligen realen Instruments. Anfangs wurde dabei aufgrund geringer Speicherkapazitäten oft mit nur einem aufgenommenen Einzelton gearbeitet, welcher dann zur Tonhöhenvariierung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abgespielt wurde. Hierbei kommt es aber, besonders bei großen Abweichungen zur Originaltonhöhe, infolge starker Streckung oder Stauchung des Frequenzspektrums zur deutlich hörbaren Bildung von Klangartefakten.

Die drastisch deflationäre Preisentwicklung und steigende Qualität von Computerspeichersystemen steigerte die Möglichkeiten und Qualität der Samplinginstrumente enorm. Da die Menge des benötigten Speichers heute kaum noch eine Rolle spielt, ist man in der Lage, die Anzahl der gespeicherten Einzeltöne eines Instruments in mehrere Dimensionen zu erhöhen:

- Zum einen wird meist jeder spielbare Halbton (bei chromatischen Instrumenten) im Tonumfang des Instruments einzeln aufgenommen. So wird die oben erwähnte Bildung von Klangartefakten durch Streckung oder Stauchung vermieden.
- Durch die Aufteilung und jeweils einzelne Aufnahme jedes Halbtons in verschiedene Dynamikstufen kann das spektrale und dynamische Verhalten eines Instruments beliebig genau verfeinert dargestellt werden. Dies funktioniert vor allem bei Tasten- und Schlaginstrumenten wie Klavier oder Schlagzeug mit ihrer vergleichsweise simplen Form der Anregung (pro Ton einmalig ausgeführter Impuls in Form von Tastendruck bzw. Schlag mit dem Schlagzeugstock) besonders gut. Bei Blas- oder Streichinstrumenten besteht allerdings die Möglichkeit, die Tondynamik durch bestimmte Spielweisen nach dem Einschwingvorgang noch zu verändern. Hier treten ohne spezielle Gegenmaßnahmen durch einfaches "Überblenden" verschiedener Dynamikstufen Probleme in Form von starken Kammfiltereffekten auf (vgl. Hart 2010, S. 10).
- Mehrere aufeinanderfolgende Wiederholungen derselben Aufnahme eines Tons können einen sehr unnatürlichen Klangeindruck erzeugen. Um dies zu vermeiden, können mehrere Variationen eines bestimmten Tons bei derselben Dynamikstufe erstellt werden. Diese werden dann bei der Wiedergabe nacheinander abgerufen. Vor allem bei der Nachbildung von Schlagzeug und anderen perkussiven Instrumenten ist dies von großer Wichtigkeit, da es hier prinzipbedingt häufig zu diesen Wiederholungen kommt. Ein klassisches Beispiel ist das schnelle Spiel der Kickdrum im Bereich von Metal-Produktionen, welche ohne derartige Abhilfe

- dabei schnell den Klangeindruck eines Maschinengewehrs hervorruft. Daher besitzt dieses Phänomen auch den Namen "Machine Gun Effect".
- Durch die zusätzliche Erstellung von Intervall-Aufnahmen kann der Übergang zwischen verschiedenen Tönen in seiner Klangcharakteristik genauer und natürlicher dargestellt werden, als es durch die einfache Aneinanderreihung von Einzeltönen möglich ist.

Diese mehrdimensionale Erweiterung der Einzeltöne führt zu einer enormen Qualitätssteigerung des Instrumentenmodells hinsichtlich eines realistischen Klangeindrucks. Samplinginstrumente sind dadurch in der Lage, in Echtzeit einen sehr authentischen und das Original extrem akkurat abbildenden Klang durch Abspielen zuvor aufgenommener Samples zu liefern. Daher ist diese Technologie die derzeit am häufigsten genutzte Strategie zur Erstellung von Instrumentensimulationen.

Die Genauigkeit und Qualität eines Samplinginstruments hängt vor allem von Anzahl und Klangqualität der aufgenommenen Samples ab: Je mehr Aufnahmen erstellt und in das Modell implementiert werden, desto genauer kann das aufgenommene Instrument dargestellt werden. Die Klangqualität der Einzeltöne ist einzig durch die Qualität der Klangaufnahme begrenzt. Die Güte der Simulation steht also in direkter Verbindung mit dem zu betreibenden Arbeitsaufwand bei Aufnahme und Nachbearbeitung der Einzeltöne. Da es möglich ist, den Klang eines jeden erdenklichen Instruments aufzunehmen, besteht auch keine Einschränkung hinsichtlich einer bestimmten Instrumentengruppe. Dennoch sind bspw. Streichoder Blasinstrumente aufgrund ihrer komplexeren Anregungsmechanismen (Spielweisen) schwerer und nur deutlich aufwendiger nachzubilden als etwa ein Klavier.

Ein Nachteil dieser Technologie ist die begrenzte Modifizierbarkeit der Klangcharakteristik der Instrumente: Da es sich bei den Samplinginstrumenten im Prinzip um Abbildungen des "realen", bei der Aufnahme verwendeten Instruments handelt, ist eine musikalische Veränderung der Klangfarbe des Instruments nach eigenem Geschmack kaum möglich. Die physikalischen, für die Klangcharakteristik verantwortlichen Eigenschaften des Instruments wie etwa Dicke, Alter oder Beschaffenheit der Saiten oder physische Eigenschaften der Resonanzkörper sind nicht veränderbar. Auch die Art der Mikrofonierung ist nicht außerhalb der bei der Aufnahme verwendeten Mikrofonmodelle und Positionierungen veränderbar. Ein weiteres Problem ist außerdem, dass es für manche Instrumentengruppen schlicht zu viel Aufwand ist, die komplette Bandbreite an "Spielsituationen" zu erfassen. Anders als bei Klavieren ist bspw. eine ganzheitlich erfassende Aufnahme aller Situationen der möglichen Spielvariationen und -dynamiken einer Violine so umfangreich, dass diese jenseits eines vertretbaren Zeitaufwands liegt.

#### 2.4. Fazit

In diesem Kapitel wurde eine Auswahl an relevanten digitalen Klangsynthesestrategien der Klassen neben den *physikalischen Modellen* besprochen und eine Einschätzung über ihre Eignung zur Simulation realer Musikinstrumente gegeben.

Die spektralen Modelle verfolgen den Ansatz der Modellierung des Signals beim Hörer. So können sich bestimmte Mechanismen und Eigenschaften der menschlichen Klangwahrnehmung zunutze gemacht und unter Mithilfe dessen der Klangeindruck eines bestimmten Instruments simuliert werden. Die subtraktive Synthese in ihrer ursprünglichen Form kommt zwar schnell und einfach zu einem dem Instrument zumindest ähnlich klingenden Ergebnis, vermittelt aber stets einen als unnatürlich wahrgenommenen Klangeindruck. Bestimmte Weiterentwicklungen der Source-Filter-Modelle liefern bessere Ergebnisse, diese werden aber größtenteils eher der Kategorie der physikalischen Modelle untergeordnet. Die additive Synthese liefert vor allem bei harmonischen Signalen gute Ergebnisse. Jedoch ist bei komplexeren Signalen der Aufwand zur Klangsynthese enorm.

Bei den *abstrakten Algorithmen* wurde zunächst auf die Methode der *FM-Synthese* eingegangen, welche generell als digitale Klangsynthesetechnik von großer Relevanz ist, für die Modellierung von realen Instrumenten aber aufgrund der schweren Kontrollierbarkeit der Parameter eher ungeeignet ist. Die *Karplus-Strong-Synthese* stellt vor allem aufgrund ihrer enormen Effizienz eine gute Technik in der Synthese von gezupften Saiteninstrumenten dar. Auch hier überschneidet sich bei den Weiterentwicklungen allerdings die Kategorisierung mit den physikalischen Modellen.

Das Sampling als Kategorie der klangoptimierten Aufzeichnungen stellt die heutzutage meistgenutzte Technologie in der Erstellung von Instrumentensimulationen dar. Durch verschiedene, oben besprochene Erweiterungen und Verbesserungen des Modells ist es möglich, den Klang eines realen Instruments sehr genau abzubilden.

Nachfolgend soll nun eine weitere Klasse der Klangsynthesestrategien betrachtet werden: Die physikalischen Modelle, welche auch unter dem Begriff des Physical Modelling oder der PM-Synthese zusammengefasst werden können. Diese unterscheiden sich von den oben genannten Klassen insofern grundlegend, als dass sie den Klang direkt an der Quelle modellieren. Dies geschieht in ihrem Fall durch eine physikalische Beschreibung der Klangquellen, bspw. der Musikinstrumente. Die Möglichkeiten der Klangmanipulation orientieren sich dabei an den physikalischen Gesetzen der Klangerzeugung und versuchen dabei stets die komplette Bandbreite der möglichen Anregungsarten (Spielweisen) eines Instruments abzubilden. Dies macht diese Technik für die Synthese von Instrumentenklängen so attraktiv: Man erhofft sich neben einer natürlichen Klangcharakteristik eine intuitivere und bessere Kontrolle über die klangformenden Parameter, was einen entscheidenden Vorteil gegenüber dem Sampling darstellen würde.

Zunächst werden die Prinzipien und Hintergründe des Physical Modelling erklärt, um eine grundsätzliche Einordnung der Klangsynthesestrategie zu ermöglichen. Anschließend sollen die möglichen Paradigmen zur Erstellung physikalischer Instrumentenmodelle erläutert werden. Dies soll dem Leser ein grundlegendes Verständnis über Vorgehensweisen, Chancen und Grenzen der Klangsynthesestrategie ermöglichen. Anschließend wird der aktuelle Status des Physical Modelling betrachtet.

# 3. Physical Modelling: Grundlagen

#### 3.1. Einführung

Die Physical Modelling Synthese nutzt eine physikalische Beschreibung der Klangquelle (des Musikinstruments) als Ausgangspunkt für ihre Algorithmen. Es werden Modelle der Musikinstrumente erstellt, welche anschließend in der Lage sind, dessen Klang zu synthetisieren. Dies geschieht auf Grundlage und unter Berücksichtigung der physikalischen Gesetzte und Gegebenheiten der mit der Klangerzeugung und -formung in Verbindung stehenden Teile und Prozesse des Instruments.

#### 3.1.1. Analytisch-wissenschaftlich vs. synthetisch-künstlerisch

Grundsätzlich gibt es zwei Motivationen für die Erstellung physikalischer Modelle von Instrumenten:

- Auf der einen Seite steht die analytisch-wissenschaftliche Motivation zur Modellierung der Akustik von Musikinstrumenten. Sie dient der Erforschung der realen Instrumente, da mithilfe dieser Simulationen Versuche und Beobachtungen durchgeführt werden können, welche am realen Objekt nur schwer oder umständlich durchzuführen sind. Als Vergleich könnte man hier z.B. die Durchführung von am Computer simulierten Autounfällen in der Automobilindustrie heranziehen, um die Zahl der bei Crashtests zu Schrott gefahrenen Autos zu minimieren. Auch können so Zustände außerhalb physikalisch möglicher Grenzen simuliert werden und bspw. der Klang einer Gitarre mit 6 km langen Saiten erzeugt werden. Bei der Simulation von Musikinstrumenten können schnell und einfach Variablen des Modells (Parameter wie Dicke, Beschaffenheit, Elastizität, Masse, Volumen etc. von Instrumententeilen wie Saiten, Korpus etc.) verändert und direkt die folgende Auswirkung auf den Klang erforscht werden. Die daraus erlangten Erkenntnisse ermöglichen es wiederum den Instrumentenbauern, die Klangqualität ihrer Produkte zu steigern.
- Auf der anderen Seite steht der synthetisch-künstlerische Ansatz, dem sich diese Arbeit widmet. Hier geht es um die Synthese eines möglichst gut nutzbaren Klanges zur Simulation eines realen Instruments. Dabei wird mit einem (bestenfalls unter Anwendung eines passenden Eingabegeräts steuerbaren) Computerprogramm das Klangverhalten des realen Instruments erzeugt. Das Prinzip der physikalischen Modellierung ist im weiten Sinne auch auf die Simulation elektronischer Instrumente oder Geräte anwendbar. Diese Arbeit befasst sich vor allem mit der Simulation akustischer Musikinstrumente.

#### 3.1.2. Mathematische Modelle und ihre algorithmische Umsetzung

Die physikalischen Begebenheiten bei der Klangerzeugung von Musikinstrumenten können durch eine Reihe von *mathematischen Modellen* beschrieben werden. Diese mathematischen Modelle nehmen dabei häufig die Form von partiellen Differentialgleichungen an und beschreiben bei der Klangerzeugung beteiligte Teile des Instruments wie Saiten, Luftdruckverhältnisse in Blasinstrumenten oder Resonanzkörpern. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die jeweiligen Instrumententeile stets der Beschreibungen der partiellen Differentialgleichungen (oder anderen mathematischen Modellen) folgen. Sind nun alle Anfangs- und Rahmenbedingungen (Ausgangspositionen, Verhalten der Instrumententeile) sowie die von außen wirkenden, zeitvarianten Kräfte (Anregung des Systems durch Zupfen, Schlagen etc.) bekannt, können die Bewegungen des Systems mathematisch zu jeder Zeit und an jedem Ort sehr genau beschrieben werden (vgl. Smith, III 2010, S. 10). Der Grundgedanke lautet also: Wenn ein Modell möglichst akkurat die Bewegung und das Verhalten der Instrumententeile simuliert, wird der daraus synthetisierte Klang dem "Original" entsprechen.

Eine große Herausforderung des Physical Modelling besteht nun darin, aus diesen mathematischen Modellen möglichst genaue und zugleich effiziente rechnerische Modelle zu erstellen, welche als Algorithmus implementiert und auf handelsüblichen Computern zur Klangsynthese genutzt werden können. Dies erreicht man durch Diskretisierung und/oder Vereinfachung des mathematischen Modells. Das führt unter anderem wiederum dazu, dass der synthetisierte Klang des Modells sich vom Klang des realen Instruments leicht unterscheidet. Ziel und Schwierigkeit ist es, diese Formen der Approximation so zu wählen, dass man eine möglichst akkurate Darstellung des Naturklangs bei einer möglichst geringen Rechenleistung erreicht. Hierzu gibt es einige verschiedene Herangehensweisen. Eine Kategorisierung dieser Methoden fällt schwer, da die Modelle auf sehr vielen verschieden, teilweise schwer untereinander abzugrenzenden Techniken basieren können. Ggf. macht eine Unterteilung der Techniken nach der Gruppe des zu simulierenden Instruments Sinn (gestrichene/gezupfte Saiteninstrumente, Blasinstrumente, perkussive Instrumente,...), wie sie bspw. von Smith in (Smith, III 2010) vorgenommen wird. Diese Arbeit orientiert sich an einer häufig genutzten, dabei oft in leicht unterschiedlicher Form verwendeten (Välimäki et al. 2006; Bilbao 2007; Tolonen et al. 1998) Unterteilung der Modellgruppen, nach welcher die Paradigmen in die Gruppen der Finite-Differenzen-Methoden, Masse-Feder Netzwerke, Modalsynthese, Digitalen Wellenleiter und Source-Filter Modelle unterteilt werden.

#### 3.1.3. Geschichte

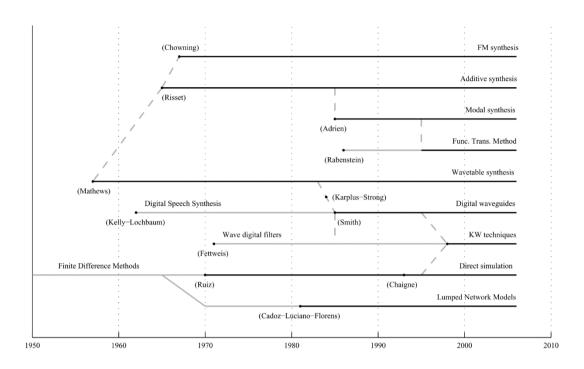


Abbildung 7: Zeitstrahl der digitalen Klangsynthesestrategien. Quelle: (Stefan Bilbao 2007, S. 2)

Zunächst wird zum besseren Verständnis der PM-Synthese kurz auf ihre geschichtliche Einordnung eingegangen. Abbildung 7 zeigt in einem Zeitstrahl die Entwicklung der physikalischen Modelle und anderen digitalen Klangsynthesetechniken ab dem Jahr 1950. Ein wirklicher Startpunkt oder Beginn der Nutzung von physikalischer Modellierung als Klangsynthesestrategie ist schwer auszumachen. Oftmals wird das 1962 von Kelly und Lochbaum vorgestellte Modell zur Simulation des menschlichen Vokaltrakts als erstes physikalisches Modell einer Klangquelle zum Zweck der Klangsynthese bezeichnet. Das dabei verwendete Prinzip wurde später zu Teilen in der Entwicklung der Klangsynthese mit digitalen Wellenleitern (engl. Digital Waveguides) aufgegriffen. Zuvor erschien der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Karplus-Strong Algorithmus, welcher durch seine Einfachheit und Effizient zur damaligen Zeit eine (bis heute relevante) revolutionäre Technik zur Synthese von Saitenklängen darstellte. Angestoßen von diesen Technologien entwickelte schließlich Mitte der 1980er Jahre unter anderen Julius O. Smith am CCRMA (Center for Computer Research in Music and Acoustics) der Universität Stanford die digitale Wellenleitersynhtese, welche bis heute vor allem in der Simulation von Saiteninstrumenten die populärste Technologie der physikalischen Modelle darstellt. Smith gilt als Pionier dieser Technologie und forscht bis heute an Weiterentwicklungen und neuen Modellen. Die erste durch Diskretisierung der Wellengleichung erzielte Simulationen einer schwingenden Saite als Finite-Differenzen-Modell wurde Anfang der 1970er Jahre von Hiller und Ruiz vorgestellt. Der Synthese eines einer Sekunde langen Klangs musste dabei allerdings eine mehrminütige Berechnung vorhergehen. Schnellere Ergebnisse lieferten das vor allem von Cardoz und seinen Kollegen entwickelte CORDIS Framework, womit man (fast) in Echtzeit Klang synthetisieren konnten. CORDIS basiert wie die Finite-Differenzen Methoden auch auf der Lösung von partiellen Differentialgleichung durch Diskretisierung, nutzt aber eine Beschreibung seiner Modelle als *Masse-Feder Netzwerke*. 1991 stellte Adrien am IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) in Paris erstmalig das Prinzip der *Modalsynthese* vor. Der erste auf dem Prinzip der PM-Synthese beruhende kommerzielle Hardware-Synthesizer ist der 1994 erschiene Yamaha VL1, welcher kurz darauf vom VL7 gefolgt wurde. Der Erfolg dieser Geräte hielt sich allerdings in Grenzen.

#### 3.2. Aufbau eines Instrumentenmodells

#### 3.2.1. Unterteilung in Blöcke

Bei der Modellierung eines Musikinstruments als komplexes System lohnt es sich, dies in verschiedene miteinander verbundene Blöcke zu unterteilen und diese gesondert zu modellieren. Nach (Borin et al. 1992) bieten sich dabei im Grunde drei Herangehensweisen der Unterteilung an:

- Eine Unterteilung des Instruments nach *physikalischer Zugehörigkeit* seiner Einzelteile, welche wiederum mathematisch einfacher zu beschreiben sind: So wird etwa eine Geige in die Blöcke Saiten, Steg, Bogen und Korpus zerlegt.
- Eine weitere Möglichkeit ist die Einteilung des Instruments nach *funktionaler Struktur*, wobei ein Musikinstrument in zwei Blöcke unterteilt wird: Der Erreger, welcher die Schwingung des Systems auslöst und dem Resonator, welcher die im musikalischen Sinne interessante Schwingungscharakteristik und somit den Klang des Instruments beschreibt. In Bezug auf die Geige würde man hierbei den Bogen als Erreger und Saiten, Steg, Korpus als den Klang definierenden Resonator unterteilen.
- Außerdem kann ein Modell auch formal nach der *Einfachheit der Beschreibung* seiner Bestandteile unterteilt werden. Dabei werden die resultierenden Gleichungen aus mathematischer Sicht sinnvoll gruppiert, etwa in einen linearen und nicht-linearen Block<sup>3</sup>. In der Praxis kommt es oft zu einem Kompromiss aus verschiedenen "Unterteilungsarten", so bestehen Geigenmodelle meist aus einem nichtlinear modellierten Erreger bestehend aus Bogen und der Interaktion des Musikers sowie einem linear modellierten Resonator bestehend aus Saiten, Steg und Korpus (vgl. Borin et al. 1992, S. 31).

Durch Beschreibung aller Blöcke und Definition ihrer Verbindungen erhält man schließlich das gesamte Modell des Musikinstruments. Innerhalb des Modells existieren nun sog. Zugangspunkte (engl. access points). Dabei handelt es sich um die "zugänglichen" Punkte der Blöcke, an denen Verbindungen gelegt und somit Signale zugeführt (bspw. Inputsignal als Aktion des Musikers) oder entnommen (bspw. zur Klangsynthese) werden können.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Linearität in Zusammenhang mit physikalischen Modellen kann man so verstehen, als dass bspw. eine geringe Änderung der Kontrollparameter auch nur eine geringe Änderung auf den produzierten Klang nach sich zieht. Ein Beispiel für eine darzustellende Nichtlinearität wäre etwa der sehr leichte Anschlag einer Klaviertaste: Bei entsprechend sachtem Anschlag produziert das Klavier keinen Ton, ab einem bestimmten Punkt in der Anschlagsstärke kommt es plötzlich zur Tonbildung.

#### 3.2.2. Black Box vs. White Box

Grob betrachtet findet die Modellierung der Blöcke dabei auf eine Art statt, die zwischen den Extremfällen der *Black Box* und *White Box* Modellierung angesiedelt ist.

- Eine reine Black Box-Modellierung würde hier der Definition einer Transferfunktion des Blocks ohne Beachtung jeglicher im Musikinstrument vorhandenen physikalischen Gegebenheiten entsprechen. Dieser Ansatz ist zwar sehr kostengünstig zu realisieren, meist jedoch zu unflexibel, da keinerlei Zugriff auf die einzelnen klangbeeinflussenden Parameter des Instruments besteht.
- Eine Beschreibung der Blöcke als White Box besteht im Gegensatz dazu aus der expliziten Angabe aller das System beschreibenden Gleichungen. Dies bietet zwar größtmögliche Freiheiten für ein Eingreifen auf Parameter und Modifizierbarkeiten des Klangs, ist aber schlichtweg zu komplex, um vollständig zu einem realisierbaren Modell konstruiert zu werden.

Typischerweise werden die einzelnen Blöcke eines Systems je nach Anspruch an ihre Modifizierungsmöglichkeiten und Effizienz mehr oder weniger in Richtung eines Black Box- oder White Box-Prinzips beschrieben.

#### 3.2.3. Verbindungen

Es existieren verschiedene Arten von Verbindungen zwischen den Blöcken des Systems: Der einfachste Fall ist eine *unidirektionale Verbindung* nach dem Feed-Forward-Prinzip, also eine einseitige Weitergabe von Information. Des Weiteren können die Blöcke auch über *bidirektionale Verbindungen* durch ein Feed-Back-System gekoppelt sein, wobei ein beidseitiger Informationsaustausch zwischen den Blöcken möglich ist. Eine Weiterentwicklung der bidirektionalen Verbindung existiert in Form von *modularen Verbindungen*, wobei der Verbindung eine Schnittstelle beiwohnt, die kontrolliert, wann welche Informationen weitergegeben werden.

#### 3.3. Anregung

Größte Beachtung bei der Erstellung von physikalischen Instrumentenmodellen erfahren vor allem jene Blöcke, die den Resonator des Systems beschreiben, da hier die Klangcharakteristik des Instruments definiert wird. So geht es bei den in Kapitel 4 erläuterten Paradigmen hauptsächlich um die Modellierung des Resonator-Blocks, während die Anregung des Systems durch den Erreger oft gesondert betrachtet wird. Aufgrund der für die meisten Fälle allgemeinen Gültigkeit der Modellierung der Anregung eines Systems soll daher an dieser Stelle darauf eingegangen werden.

Die einfachste Möglichkeit zur Modellierung der Anregung besteht darin, lediglich die Anfangsbedingungen des Resonators zu definieren und das System anschließend sich selbst zu überlassen. Dies wird häufig bei Modellen gezupfter Saiten angewandt, wo statt des gesamten Zupfvorgangs nur die anfängliche Auslenkung der Saite definiert wird. Die modellierten Rückstellkräfte sorgen für eine Bewegung und schließlich Schwingung der Saite, aus der sich dann der Klang synthetisieren lässt. Größter Vorteil dieses Prinzips ist sicherlich der enorm geringe Aufwand und einfache "Implementierbarkeit" in die meisten Modelle. Da allerdings keine Rückwirkung des Systems auf den Erreger besteht und der Resonator bei der Anregung jedes Mal wieder in seinen Anfangszustand versetzt werden muss, eignet sich diese Art der Modellierung nicht zur Simulation aller Spielweisen von Instrumenten: So lassen sich gestrichene Saiten nur sehr schlecht auf diese Weise modellieren, auch der Fall der Klangveränderung bei der Anregung einer bereits schwingenden Saite wird hier komplett vernachlässigt.

Bei der direkten Erregung wird der Erreger als eigenständiger Erreger-Block modelliert, der über eine unidirektionale Verbindung mit dem Resonator verbunden ist. Es besteht also auch hier kein vom Resonator rückwirkender Informationsweg, allerdings kann das Ausgangssignal des Erregers eigenständig modelliert und auch bereits angeregten (schwingenden) Resonatoren zugefügt werden. Der Erreger-Block besteht dabei meist aus einem nach dem oben beschriebenen Black Box-Prinzip modellierten Wavetable, welcher das Erregersignal enthält.

Erreger können auch als mit dem Resonator bidirektional verbundene Blöcke modelliert werden. Das Ausgangssignal des Erregers ist dabei die Summe aus dem vom Resonator zurückkommenden Signal und einem externen Inputsignal, welches meist die Aktion des Musikers beschreibt. Dies stellt eine deutlich akkuratere Abbildung der Interaktion des Musikers mit dem Instrument dar, ist aber in seiner Implementierung entsprechend aufwendiger.

#### 3.4. Partielle Differenzialgleichungen

Wie in 3.1.1 beschrieben, werden für die mathematischen Modelle zur Beschreibung der Musikinstrumente oft partielle Differentialgleichungen genutzt. Typischerweise ist bei der Modellierung von Saiteninstrumenten durch digitale Wellenleiter oder die Finite-Differenzen Methoden die Wellengleichung Ausgangspunkt zur Beschreibung der Saitenbewegung. Die Wellengleichung kann neben der schwingenden Saite auch für die Beschreibung einer schwingenden Membran oder einer Luftsäule in einer Röhre genutzt werden, was ein oft genutztes Modell zur Simulation von Blasinstrumenten ist.

Aufgrund der hohen Relevanz für das Themengebiet des Physical Modelling soll eine solche partielle Differentialgleichung im Folgenden erläutert werden. Als Beispiel wird hierfür eine u.a. in (Bensa et al. 2003b) vorgestellte partielle Differentialgleichung zur Modellierung der schwingenden Saite eines Klaviers herangezogen. Als Ausgangspunkt besitzt sie die allgemein gültige Wellengleichung als Beschreibung einer idealen unendlich langen Saite. Zur Anpassung an die Schwingung einer realen Klaviersaite wird anschließend die frequenzunabhängige und frequenzabhängige Dämpfung sowie Dämpfung aufgrund von Steifigkeit in das Modell implementiert. Das dabei verwendete Prinzip gilt nicht nur für Klaviersaiten, sondern wird auch zur Beschreibung jeglicher Saitenschwingungen, bspw. bei Instrumenten wie Gitarren, Geigen oder Cellos sowie Modellierung der Luftdruckvariationen bei Instrumenten wie Klarinetten, Flöten, Orgelpfeifen usw. genutzt.

Die vorgestellte partielle Differentialgleichung zur Beschreibung einer Saitenschwingung ist gegeben durch

$$\epsilon \ddot{y} = Ky'' - d_1 \dot{y} + d_2 \ddot{y}' - EIy''' \tag{3}$$

mit

y = y(t, x) = die transversale Saitenauslenkung an der Position x zum Zeitpunkt t

$$\dot{y} = \frac{\partial y}{\partial t}(t, x), \quad y' = \frac{\partial y}{\partial x}(t, x), \quad \ddot{y} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(t, x), \quad y'' = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(t, x), \quad \text{(usw.)}$$

 $K \triangleq$  konstante Saitenspannung entlang der Saitenachse (N)

 $\epsilon \triangleq$  konstante, lineare Massendichte der Saite (kg/m)

 $E \triangleq \text{Elastizitätsmodul } (N/m^2)$ 

 $I \triangleq Streumassenradius des Saitenquerschnitts (m)$ 

 $\ddot{y} \triangleq \text{Beschleunigung der Saite}$ 

#### 3.4.1. Die ideale freischwingende unendlich lange Saite als eindimensionale Wellengleichung

Die Wellengleichung für die Beschreibung einer idealen, verlustfrei schwingenden und unendlich langen Saite ist gegeben durch

$$\epsilon \ddot{\mathbf{y}} = K \mathbf{y}^{"} \tag{4}$$

bzw.

$$\ddot{y} - c^2 * y^{\prime\prime} = 0 \tag{5}$$

wobei für die longitudinale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle c in (m/s) gilt:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\epsilon}} \tag{6}$$

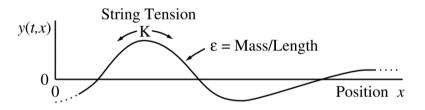


Abbildung 8: Die ideale, schwingende Saite. Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 2)

Zur Herleitung der Wellengleichung wird auf Fachliteratur der musikalischen Akustik, bspw. (Morse 1948) verwiesen. Grob gesprochen wird hier die auf den beobachteten Punkt der Saite wirkende Rückstellkraft zum einen beschreiben durch die Saitenspannung multipliziert mit der Krümmung der Saite, dargestellt durch die Gleichung K \* y". Dies wird gleichgesetzt mit einer Abwandlung des 2. Newtonschen Bewegungsgesetztes, der linearen Massendichte der Saite multipliziert mit der transversalen Beschleunigung, beschrieben durch  $\epsilon * \ddot{y}$ . Eine weitere, verbreitete Schreibweise ist in Gleichung (5) gegeben.

Diese Wellengleichung ist gültig für alle vollständig elastischen Medien, welche entlang einer Dimension ausgelenkt werden. Eine Erweiterung der Wellengleichung in die zweite und dritte räumliche Dimension ist möglich, wird aber aufgrund des enormen rechnerischen Mehraufwands innerhalb physikalischer Instrumentenmodelle nur selten angewandt, weshalb an dieser Stelle von einer weiterführenden Erläuterung abgesehen wird.

#### 3.4.2. Die verlustbehaftete eindimensionale Wellengleichung

Bei realen Saiteninstrumenten treten stets Energieverluste, unter anderem durch Reibung an den Befestigungen der Saitenenden oder Luftwiderstand auf. Diese sind daher bei allen Saitenmodellen zu berücksichtigen und ermöglichen es, unter anderem die Abklingzeit und Art des Abklingvorgangs (bei frequenzabhängiger Dämpfung klingen meist hohe Frequenzen schneller aus) zu steuern.

In obiger Gleichung (3) geschieht dies in zweierlei Form:

- Der Term  $d_1 * \dot{y}$  beschreibt den einfachsten Fall der frequenzunabhängigen Dämpfung, wobei sich die Dämpfung direkt proportional zur transversalen Saitengeschwindigkeit  $\dot{y}$  mit  $d_1$  als materialabhängige Proportionalitätskonstante verhält.
- $d_2*\ddot{y}'$  beschreibt die *frequenzabhängige Dämpfung.* In fast allen natürlichen Wellenerscheinungen, sei es bei der schwingenden Saite, akustischen Röhren oder Schallübertragung im Konzertsaal wächst durch innere Luftreibung der Verlustkoeffizient mit steigender Frequenz. Eine Möglichkeit, diese frequenzabhängigen Verluste zu modellieren, ist durch die Integration von Zeitableitungen höherer ungerader Ordnung wie  $\frac{\partial^3 y}{\partial t^3}$ ,  $\frac{\partial^5 y}{\partial t^5}$ , usw. (vgl. Hagenow 2001a, S. 36). In aktuelleren Modellen wie obiger partieller Differentialgleichung wird stattdessen häufig eine gemischte zeitliche und räumliche Ableitung verwendet, da dies die rechnerische Stabilität des Modells deutlich erhöht. Dabei wird in (Bensa et al. 2003b) außerdem darauf hingewiesen, dass dieser Term die frequenzabhängige Dämpfung trotzdem nur approximiert wiedergibt. Für eine besonders genaue Darstellung der Dämpfung müsste das Modell mehr als die beiden oben verwendeten Terme beinhalten. Da dies den Rechenaufwand immens erhöhen würde, wird die verfeinerte Darstellung des Dämpfungsverhalten stattdessen häufig mithilfe digitaler Filter in das Modell implementiert.

Die Abklingzeit der Saitenschwingung kann in Gleichung (3) also über die Parameter  $d_1$  und  $d_2$  gesteuert werden.

#### 3.4.3. Die dispersive eindimensionale Wellengleichung

Der Term E \* I \* y"" modelliert eine transversale Rückstellkraft der Saite, welche durch die Steifigkeit des schwingenden Mediums verursacht wird. Die Steifigkeit der Saite ist eine lineare Eigenschaft, welche sich proportional zur vierten räumlichen Ableitung verhält. In obiger Gleichung wird sie modelliert durch ein Produkt aus den Materialkonstanten Elastizitätsmodul (Young-Modul) und Streumassenradius des Saitenquerschnitts sowie der vierten räumlichen Ableitung.

Im Falle einer idealen Saite mit einem Durchmesser von 0 m ist diese Kraft = 0. Bei Modellen für Gitarren oder Violinen wird dieser Kraft oft aufgrund der vergleichsweise geringen Saitendurchmesser vernachlässigt. Bei Piano- oder Cellomodellen hingegen spielt sie im Bereich der tieferen Tonlagen eine zu berücksichtigende Rolle, da das menschliche Gehör die durch die Steifigkeit der Saite ausgelöste Erweiterung der partiellen Obertöne ab einem gewissen Saitendurchmesser wahrnimmt (vgl. Smith, III 2008, S. 3).

#### 3.4.4. Anregung

Die Anregung der Saite kann auf unterschiedliche Arten modelliert werden, sie hängt in der Regel von der für die modellierte Instrumentengruppe übliche Spielweise (gestrichene oder gezupfte Saiteninstrumente) ab. Bei der Modellierung einer gezupften Saite kann dies im einfachsten Fall wie in 3.3 beschrieben durch Definition der Anfangsbedingungen realisiert werden, wobei die Saite in einen aus der Ruheposition ausgelenkten Zustand versetzt wird.

Der Zupfvorgang bei einer echten Saite ist allerdings deutlich komplexer als das ledigliche "Loslassen" der Saite aus einer solchen Ausgangsposition – die physischen Eigenschaften von Finger oder Plektrum beeinflussen das Schwingungsverhalten der Saite hörbar. Vernachlässigt wird auch, dass sich der Vorgang des "Lösens" der Saite aus der definierten Anfangsauslenkung im realen Fall eher sukzessiv statt sofortig verhält.

## 4. Paradigmen der Erstellung physikalischer Modelle

Im diesem Abschnitt soll nun ein Überblick über die verschiedenen Techniken und Methoden zur Modellierung und digitalen Klangsynthese von Musikinstrumenten gegeben werden. Hierzu wird die Einteilung der Paradigmen in die Klassen der *Finite-Differenzen-Methoden*, *Masse-Feder-Netzwerke*, *Modalsynthese*, digitalen Wellenleitern und Source-Filter Modellen gewählt. In Bezug auf die in 3.2.1 besprochenen Blöcke geht es hier oft um die Modellierung des für die Klangcharakteristik des Instruments ausschlaggebenden Resonator-Blocks. Die Anregung des Systems wird, je nach Paradigma und Art der Anregung, über einen separaten Erreger-Block oder direkt in das beschriebene Modell implementiert.

#### 4.1. Finite-Differenzen-Methoden

Eine Möglichkeit der Schaffung rechnerischer Modelle aus mathematischen Modellen ist die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen mit den *Finite-Differenzen-Methoden*. Im Folgenden soll dies am Beispiel eines Saitenmodells, wie es bspw. zur Modellierung einer Gitarre genutzt werden kann, erläutert werden. Ausgehend von der Lösung für eine ideale Saitenschwingung wird das Modell an die Situation am realen Instrument angeglichen. Dies geschieht durch Berücksichtigung der Randbedingungen an den Endpunkten einer eingespannten Saite, der frequenzunabhängigen und frequenzabhängigen Dämpfung, der Steifigkeit der Saite und der Art der Anregung. Die Finite-Differenzen-Methoden liefern uns eine *endliche Differenzengleichung* als Lösung der partiellen Differentialgleichung, welche sich gut in einen entsprechenden Algorithmus eines Instrumentenmodells implementieren lässt. Die folgende Einführung in die Finite-Differenzen-Methoden orientiert sich grob an der in (Välimäki et al. 2006) beschriebenen Formulierung dieses Paradigmas.

#### 4.1.1. Finite-Differenzen-Modelle für eine ideale schwingende Saite

An dieser Stelle soll wie in 3.4.1 das Modell der idealen (unendlich langen, dämpfungsfreien und unendlich flexiblen) Saite als Ausgangspunkt gewählt werden.

Deren Beschreibung ist gegeben durch die Wellengleichung (siehe 3.4.1) mit

$$\epsilon \ddot{\mathbf{y}} = K \mathbf{y}^{"} \tag{7}$$

bzw.

$$\ddot{y} = c^2 * y'' \tag{8}$$

 $mit c = \sqrt{K/\epsilon}$ 

Es gibt einige Wege zur Approximation der Wellengleichung durch endliche Differenzengleichungen. Eine Möglichkeit bietet die Anwendung der Euler-Streckungsverfahren:

Explizites Euler-Streckungsverfahren (Euler-Vorwärts):

$$f'(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$
 (9)

Implizites Euler-Streckungsverfahren (Euler-Rückwärts):

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x}$$
 (10)

Modifiziertes Eulerverfahren:

$$f'(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$
 (11)

Für die zweite Ableitung erhalten wir durch doppelte Anwendung des modifizierten Eulerverfahrens

$$f''(x) \approx \frac{f'(x + \Delta x) - f'(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$

$$f''(x) \approx \frac{\frac{f(x + 2\Delta x) - f(x)}{2\Delta x} - \frac{f(x) - f(x - 2\Delta x)}{2\Delta x}}{2\Delta x}$$

$$f''(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2}$$
(12)

unter Festlgeung von  $2\Delta x \rightarrow \Delta x$ .

Durch Anwendung von (12) auf jeweils die zweite räumliche und zweite zeitliche Ableitung der partiellen Differentialgleichung (8) erhalten wir unter Verwendungen der Indizes n für einen diskreten zeitlichen und k für einen diskreten örtlichen Punkt folgende Lösung der Wellengleichung:

$$\frac{y(n+1,k)-2y(n,k)+y(n-1,k)}{r^2} = c^2 * \frac{y(n,k+1)-2y(n,k)+y(n,k-1)}{r^2}$$
(13)

wobei T das zeitliche und X das räumliche Samplinginterall darstellen.

Die Größe der zeitlichen und räumlichen Samplingintervalle werden dabei so gewählt, dass

$$R = \frac{cX}{T} \le 1 \tag{14}$$

gilt. R ist dabei die CFL-Zahl<sup>4</sup> und gibt vor, dass sich die Wellen im Modell pro zeitlichem Samplingintervall um höchstens ein räumliches Samplingintervall fortbewegen. Dies ist für die rechnerische Stabilität des Modells Voraussetzung.

Setzt man nun R = 1, kann man (13) wiefolgt ausdrücken:

$$y(n+1,k) = y(n,k+1) + y(n,k-1) - y(n-1,k)$$
(15)

Der jeweils nächste Wert für die Saitenauslenkung y(n+1,k) kann also stets lediglich mithilfe des vorhergegangenen Werts y(n-1,k) sowie den aktuellen Werten der beiden benachbarten Ortspunkte y(n,k+1) und y(n,k-1) berechnet werden. Diese Art der Differenzengleichung wird auch als *Sprungrekursion* bezeichnet und eignet sich bestens zur Implementierung in einen effizienten Algorithmus.

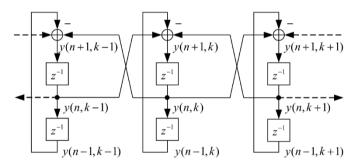


Abbildung 10: Blockdiagramm der Signalverarbeitung einer Finite-Differenzen-Approximation der Wellengleichung zur Zeit n am Punkt k. Quelle: (Matti Karjalainen 2002)

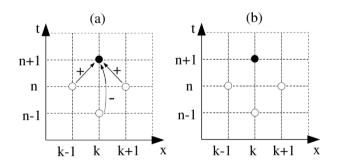


Abbildung 9: Repräsentation der eindimensionalen endlichen Differenzengleichung einer idealen Saite auf einem Zeit-Ort-Raster. Quelle: (Matti Karjalainen 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl oder Courant Zahl) bei der Diskretisierung zeitabhängiger partieller Differentialgleichungen verwendet und gibt an, um wie viele Zellen sich eine betrachtete Größe pro Zeitintervall fortbewegt.

Zum besseren Verständnis wird die dabei betriebene Signalverarbeitung in Abbildung 10 in einem Blockdiagramm dargestellt. Es zeigt, wie der nächste Saitenauslenkungswert y(n+1,k) an der betrachteten Position k aus dem vorherigen Ortswert y(n-1,k) sowie den aktuellen Werten der benachbarten Punkte y(n,k-1) und y(n,k+1) berechnet wird. Die  $z^{-1}$ -Blöcke stellen dabei Einheitsverzögerer (engl. delay unit) dar und speichern für eine Samplingperiode einen Wert von y. Abbildung 9 zeigt eine oft genutzte Darstellung solcher Finite-Differenzen-Schemata auf einem Zeit-Orts-Raster.

#### 4.1.2. Randbedingungen der endlich langen Saite

Die Saiten von realen Musikinstrumenten haben, im Gegensatz zur idealen, unendlich langen Saite, natürlich nur eine endliche Länge, welche es in das Modell zu implementieren gilt. Diese wird in unserem Beispiel definiert durch die Länge  $L_{Max}$ . Die räumliche Koordinate k unserer Saite muss also zwischen k=0 und  $k=L_{Max}$  liegen. Nun treten mit der Gleichung (15) Probleme auf, wenn es um die Berechnung der Punkte an den Saitenenden geht, da hierzu Werte von räumlich außerhalb der Saite liegenden Punkte benötigt werden. Eine einfache mögliche Lösung dieses Problems liegt darin, die Saitenenden als "fest" zu definieren (wie es bei einer in einem Instrument eingespannten Saite ja der Fall ist), sodass stets  $y(n,0)=y(n,L_{Max})=0$  gilt. Dies führt zu einer Phasendrehung der Wellen an den Enden der Saite. Eine akkuratere Modellierung wird von Hiller und Ruiz in (Hiller und Ruiz 1971) in Form einer steuerbaren, verlustbehafteten Wellenreflexion an den Saitenenden vorgestellt. Die Reflexionskoeffizienten  $\eta$  und r (linkes und rechtes Ende) steuern die Dämpfungserscheinungen bei der Reflexion.

Es gilt:

$$y(n+1,0) = (1-r_1) * y(n,1) + r_1 * y(n-1,0)$$
(16)

$$y(n+1,L_{Max}) = (1-r_r) * y(n,L_{Max}-1) + r_r * y(n-1,L_{Max})$$
(17)

Für eine verlustfreie Reflexion werden die Reflexionskoeffizienten auf 0 gesetzt, ansonsten nehmen sie einen Wert zwischen 0 und 1 an.

#### 4.1.3. Frequenz(un)abhängige Dämpfung und Steifigkeit

Wie in 3.4 beschrieben, kann die partielle Differentialgleichung für eine gedämpfte Saite folgendermaßen beschrieben werden:

$$\epsilon \ddot{\mathbf{y}} = K \mathbf{y}^{"} - d_1 \dot{\mathbf{y}} + d_2 \ddot{\mathbf{y}}^{"} - E I \mathbf{y}^{"} \tag{18}$$

wobei die Koeffizienten  $d_1$  und  $d_2$  die frequenzunabhängige bzw. frequenzabhängige Dämpfung steuern, während die Materialkonstanten E und I für ein unterschiedliches Dämpfungsverhalten nach Steifigkeit der Saite sorgen.

Die frequenzunabhängige Dämpfung kann noch relativ unkompliziert nach dem in 4.1.1 gezeigten Schema in das Modell implementiert werden. Hier wird die erste zeitliche Ableitung mithilfe des modifizierten Eulerverfahrens approximiert, sodass für (15) nach (Chaigne 1992) gilt:

$$y(n+1,k) = g_k[y(n,k+1) + y(n,k-1)] - a_k y(n-1,k)$$
(19)

mit

$$g_k = \frac{1}{1 + d_1 T/2} \tag{20}$$

und

$$a_k = \frac{1 - d_1 T/2}{1 + d_1 T/2} \tag{21}$$

Die Abklingzeit der Saite kann hier also direkt durch den Parameter  $d_1$  gesteuert werden.

Die Approximation der frequenzabhängigen Dämpfung und Steifigkeit der Saite als Differenzengleichung ist relativ umfangreich, sodass eine ganzheitliche mathematische Erläuterung hier den Rahmen sprengen würde. (Bensa et al. 2003a) beschreibt eine Implementierung der frequenzabhängigen Dämpfung, (Chaigne 1992) und (Hiller und Ruiz 1971) eine Implementierung der Steifigkeit der Saite in die Sprungrekursion der Finite-Differenzen-Modelle.

### 4.1.4. Anregung

Zur Simulation einer gezupften Gitarre kann die Anregung wie zuvor beschrieben näherungsweise durch eine Festlegung der Anfangsbedingungen der Saite in einen ausgelenkten Zustand modelliert werden. Dieser wird idealisiert insofern modelliert, als das die Seite an einem bestimmten Punkt ihrer Länge ausgelenkt wird und dadurch mit ihrer Ruheposition eine Dreiecksform bildet. Die Anfangsbedingungen für y(0,k) werden so definiert, dass die Saite keine Ausgangsgeschwindigkeit besitzt. Die Saitenauslenkung wird dann zum Zeitpunkt n=1 nach (Hiller und Ruiz 1971) wie folgt definiert:

$$y(1,k) = y(0,k),$$
  $k = 0,1,...L_{Max},$   $k = 0,1,...,L_{Max}k \neq j,j+1$  
$$y(1,k) = \frac{1}{2}[y(0,k-1) + y(0,k+1)],$$
  $k = j,j+1$ 

wobei j und j+1 die x-Koordinaten der oberen Spitze des Dreiecks der ausgelenkten Saite, dem sog. Punkt der Steigungsunterbrechung (dem Punkt, an dem die Saite ausgelenkt wird) bezeichnen. Wie in 3.4.4 beschrieben handelt es sich hier jedoch um eine stark vereinfachte Approximation der Saitenanregung. Eine Interaktion an einem oder mehreren bestimmten örtlichen Punkten des Modells ist allerdings auch möglich (vgl. Välimäki et al. 2006, S. 12).

#### 4.1.5. Implementierung

Grundsätzlich wird eine Signalentnahme (zur weiteren Verarbeitung und schließlich Klangsynthese) in einem Finite-Differenzen-Modell betrieben, indem der Wert der Saitenauslenkung als zeitvariante Signal an einem bestimmten Ort des Modells "ausgelesen" wird. Für ein Gitarrenmodell bietet sich bspw. eine Signalentnahme in der Nähe des gedachten Stegs an, da im realen Fall hier die Saitenschwingung auf den Gitarrenkorpus übertragen wird.

Großer Nachteil dieser Methode ist der enorme Rechenaufwand, da mit jedem zeitlichen Samplingintervall jeder räumliche Punkt des Saitenmodells berechnet werden muss. Finite-Differenzen-Methoden sind grundsätzlich nicht an ein bestimmtes Framework gebunden und können bspw. in etwaiger C- oder C++ -Software implementiert werden.

### 4.2. Masse-Feder-Netzwerke

Die Modellierung eines akustischen Systems als rein mechanisches Netzwerk bestehend aus Massen, Federn und Dämpfern zu Klangsynthesezwecken wurde Anfang der 1980er-Jahre von Cadoz, Luciani und Florens vorgestellt (Cadoz et al. 1983) und diente als Grundlage des von der Firma ACROE entwickelten Systems CORDIS-ANIMA (anfangs: CORDIS). Die dabei entwickelten physikalischen Modelle von Instrumenten waren damals die ersten ihrer Art, die in Echtzeit Klang synthetisieren konnten.

Das zu modellierende Instrument stellt man sich hier näherungsweise als simples mechanisches Netzwerk, bestehend aus Masse-, Feder-, und Dämpfungselementen vor. Nach (Florens und Cadoz 1991) ist ein solches System unter Voraussetzung einer genügend großen Anzahl korrekt vernetzter Elemente in der Lage, Teile eines Instruments wie eine Saite oder Membran in ihrem Schwingungsverhalten und Dynamik zu beschreiben, woraus schließlich deren Klang synthetisiert werden kann. Vor allem durch Anwendung der Newtonschen Gesetzte auf die Eigenschaften der Einzelteile und deren Interaktion kann man das Verhalten des Systems auf eine Anregung modellieren. Diese Methode ist sehr allgemein und kann prinzipiell auf jedes schwingungsfähige, akustische System angewandt werden. So können durch einfache Modellierung der Eigenschaften einer Struktur komplexe Bewegungen des Systems simuliert werden, ohne dabei die globalen Gleichungen zur Beschreibung der Schwingung zu kennen. Im Folgenden soll zunächst das Grundprinzip dieser Technik anhand eines einfachen Beispiels erklärt werden.

#### 4.2.1. Prinzip

Im einfachsten Fall besteht ein modelliertes System aus Massepunkten, (idealen) Federn und ggf. (idealen) Dämpfungskomponenten. Im Folgenden sollen diese Objekte als Partikel bezeichnet werden. Jedes dieser Partikel wird beschrieben durch eine Anzahl an Eigenschaften. Die Massepunkte besitzen jeweils eine Masse m, longitudinale Auslenkung x(t), Geschwindigkeit v(t), Beschleunigung a(t) und auf das Partikel wirkende Kraft f(t). Die Federn besitzen jeweils eine Federkonstante K, die Anfangslänge der Feder im "entspannten" Zustand  $l^0$  und die veränderliche Länge der Feder in Abhängigkeit von der Zeit l(t). Weitere Dämpfungselemente besitzen außerdem noch einen Reibungskoeffizienten Z. Aus diesen Eigenschaften und der Interaktion der jeweiligen Objekte können schließlich auf Grundlage physikalischer Gesetze mathematische Beschreibungen festgelegt werden.

Generell sind diese nach (Florens und Cadoz 1991) gegeben durch:

Massepunkte: 
$$F = m * \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$
 (23)

Federn: 
$$F_1 = F_2 = -K(x_1 - x_2)$$
 (24)

Dämpfer: 
$$F_1 = F_2 = -Z(\frac{\partial x_1}{\partial t} - \frac{\partial x_2}{\partial t})$$
 (25)

Allgemeines Verbindungselement: 
$$F_1 = F_2 = -K(x_1 - x_2) - Z(\frac{\partial x_1}{\partial t} - \frac{\partial x_2}{\partial t})$$
 (26)

mit F als auf den Massepunkt wirkende Kraft,  $F_1$  bzw.  $F_2$  als auf das Verbindungselement (Feder oder Dämpfungselement) wirkende Kräfte an den Punkten  $x_1$  bzw.  $x_2$ , K als Federkonstante und Z als Reibungskoeffizient des Dämpfungselements.

Um sich ein ungefähres Bild der Berechnung einer solchen Simulation machen zu können, soll dies nun für ein eindimensionales System unter Anwendung der in (Välimäki et al. 2006) aufgeführten Beispielrechnung grundlegend dargestellt werden:

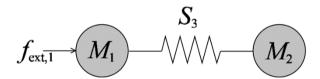


Abbildung 11: Simples, eindimensionales mechanisches System bestehend aus zwei Massepunkten und einer Feder. Quelle: (Vesa Välimäki et al. 2006, S. 15)

Betrachten wir dazu ein simples, eindimensionales mechanisches System bestehend aus zwei Massepunkten  $M_1$  und  $M_2$ , welche verbunden sind durch die Feder  $S_3$ . Die Komponenten können sich dabei nur auf der x-Achse bewegen. Auf  $M_1$  wirkt eine externe Kraft  $f_{ext,1}$ . Zur Vereinfachung wird dabei auf die Verwendung von zusätzlichen Dämpfungselementen verzichtet.

Die auf die Partikel wirkenden Kräfte in Abhängigkeit von der Zeit können nun nach (23) und (24) beschrieben werden durch:

$$f_1(t) = m_1 * a_1(t) \tag{27}$$

$$f_2(t) = m_2 * a_2(t) \tag{28}$$

$$f_3(t) = k(l_3^0 - l_3(t)) \tag{29}$$

wobei die zeitvariante Länge der Feder l(t) abhängig ist von der Position der Massepunkte  $x_1$  und  $x_2$ :

$$l_3(t) = x_2(t) - x_1(t) (30)$$

Auf Grundlage der Energieerhaltung können nun die folgenden Aussagen über die Gleichheit der auf die Partikel wirkenden Kräfte getroffen werden:

$$f_1(t) = f_{ext,1}(t) - f_3(t) \tag{31}$$

$$f_2(t) = f_3(t)$$
 (32)

Meistens geht es bei der Simulation eines solchen Systems um die Berechnung der Auslenkungen  $x_1(t)$  und  $x_2(t)$  der Massepunkte als Ergebnis der Einwirkung der externen Kraft  $f_{ext,1(t)}$  (vgl. Välimäki et al. 2006, S. 15). Dies ist in der oben gezeigten Simulation problemlos möglich. Zur Diskretisierung des Systems wird, wie in 4.1.1, das Euler-Streckungsverfahren angewandt. Durch zweifache Anwendung des expliziten Euler-Streckungsverfahrens auf die Beschleunigung a als zweite zeitliche Ableitung in (27) und (28) erhalten wir für die Positionen  $x_1(n)$  und  $x_2(n)$ :

$$x_1(n) = \frac{1}{m_1} f_1(n) + 2x_1(n-1) - x_1(n-2)$$
(33)

$$x_2(n) = \frac{1}{m_2} f_2(n) + 2x_2(n-1) - x_2(n-2)$$
(34)

wobei  $f_1(n)$  bzw.  $f_2(n)$  die auf das Partikel wirkende Kraft zum diskreten Zeitpunkt n darstellen und  $\Delta T$  als zeitliches Samplingintervall vereinfachend normalisiert wird.

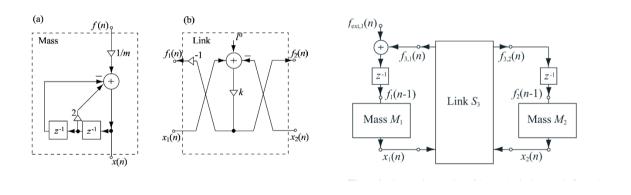


Abbildung 12: Basiselemente eines Masse-Feder-Netzwerks. Quelle: (Vesa Välimäki et al. 2006, S. 16)

Abbildung 12 veranschaulicht links unter (a) den Massepunkt als lineares, zeitvariantes System, welches die Auslenkung x(n) in Abhängigkeit der auf das Partikel wirkenden Kraft f(n) berechnet. Daneben das Verbindungselement unter (b), welches die Interaktions-Relationen (30), (31) und (32) implementiert. Der rechte Block veranschaulicht schließlich eine Implementierung des besprochenen

Beispielmodells<sup>5</sup> bestehend aus zwei Masse-Elementen und einem Verbindungselement, wobei die auf die Massepunkte  $M_1$  bzw.  $M_2$  wirkenden Kräfte als  $f_{3,1}(n)$  bzw.  $f_{2,1}(n)$  bezeichnet werden.

Dabei gilt:

$$f_3(n) = k(l_3^0 - x_2(n) + x_1(n)) \tag{35}$$

$$f_1(n) = f_{ext,1} - f_3(n) \tag{36}$$

$$f_2(n) = f_3(n)$$
 (37)

Bei dem gezeigten Modell handelt es sich um ein einfaches Beispielmodell, um das grundsätzliche Vorgehen zu erläutern. Komplexere Modelle, welche sich zur Simulation von Musikinstrumenten eignen, benötigen zusätzliche Elemente zur Realisierung von Dämpfung und Auslöschung der Kräfte, zeitvarianter Interaktionen und Nicht-Linearitäten (vgl. Välimäki et al. 2006, S. 17).

### 4.2.2. Implementierung

Das Vorgehen bei der Erstellung von Instrumentenmodellen als Feder-Masse Netzwerke ist generell stark an die jeweiligen verwendeten Programme gebunden. Eine große Rolle spielt dabei das CORDIS-ANIMA System, welches auch als Grundlage für weitere Frameworks dient. CORDIS-AMINA baut auf dem Prinzip des in 4.2.1 gezeigten Beispiels auf. Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Elementen (sog. Module) innerhalb von CORDIS-ANIMA:

- <MAT> Module repräsentieren die oben beschriebenen Massepunkte ähnlich Figur (a) in Abbildung 12. Sie können in Bezug auf ihre Input-/Output-Relationen definiert werden.
- <LIA> Module repräsentieren die physikalischen Verbindungs-/Interaktionselemente zwischen den <MAT> Modulen, ähnlich Figur (b) in Abbildung 12. Auch sie können in Bezug auf ihre Input-/Output-Relationen definiert werden. Dabei kann es sich wie in obigem Beispiel um ideale Federn oder eine gedämpfte Feder (beschrieben durch einen Dämpfungskoeffizienten) handeln.

<MAT> Module sind in der Lage, eingehende Impulse zu verarbeiten und auszugeben. So können Interaktionen modelliert und auf Grundlage der Bewegung der Module Klang synthetisiert werden. Die CORDIS-ANIMA Bibliothek kann außerdem durch weitere Module (meist Abwandlungen der oben besprochenen Basis-Module) erweitert werden. Eine Erweiterung in Hinsicht auf die Entwicklung musikalischer Applikationen stellt die Software GENESIS dar. Hierbei handelt es im Prinzip ein auf Musikschaffende zugeschnittenes User-Interface für das CORDIS-AMINA System. Die aktuelle Version des Systems G³ bietet drei Hauptinterfaces: Ein graphisches Modellierungsfenster, ein textliches Modellierungsfenster und ein Simulationsfenster. In den Modellierungsfenstern kann der User relativ

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Anmerkung: Dabei wird zur Vermeidung einer verzögerungsfreien Schleife jeweils ein Delay-Element vor die Massepunkte geschaltet. Siehe Välimäki et al. 2006, S. 13 für eine weitreichendere Beschreibung dieses Problems.

intuitiv sein Modell erstellen, das Simulationsfenster dient zur Beobachtung und Evaluierung des erstellten Modells. Hier wird auch der synthetisierte Klang hörbar gemacht.

Ein weiteres CORDIS-ANIMA-nahes System ist PMPD. Dabei handelt es um eine Sammlung von Pure-Data<sup>6</sup> Objekten, mit denen sich durch den Aufbau von Masse-Feder Netzwerke akustische Systeme simulieren lassen. Dabei ist (Pure Data-typisch) eine Klangsynthese in Echtzeit möglich. Gemäß dem CORDIS-AINA Prinzip wird hier grundsätzlich in die Klassen der "Mass'- und "Link'-Objekte unterteilt. Neben ein- oder mehrdimensionalen Masse-Feder-Verbindungen können in PMPD auch geometrische Objekte wie Quadrate, Kreise, Würfel oder Kugeln definiert werden. Es ist dabei aber anzumerken, dass PMPD nicht mit dem primären Ziel der Klangsynthese geschaffen wurde. Es dient viel mehr der physikalischen Simulation realer Objekte und Systeme in Hinblick auf die Verwendung in interaktiven Medien. Als Beispielprojekte werden von Entwicklerseite etwa ein hüpfender Ball, Bewegungen einer Saite, Brownsche Bewegung, Chaos, Flüssigkeitsdynamik, Sand und Gravitation genannt. PMPD eignet sich also vorrangig zum Erarbeiten und Verstehen der Grundprinzipien eines interaktiven Masse-Feder-Netzwerks. Weitere Entwicklungsumgebungen des Masse-Feder-Netzwerk Paradigmas sind außerdem PhyMod, TAO und CYMATIC.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Pure Data ist eine datenstromorientierte Entwicklungsumgebung und wird vorrangig zur Audiosynthese (in Echtzeit) genutzt. Durch ihre visuelle Programmierung (die Arbeit mit Blöcken und Verbindern) ist sie intuitiv bedienbar und eignet sich gut zur Erstellung interaktiver Software.

### 4.3. Modalsynthese

Die *Modalsynthese* oder verwandte modale Synthesestrategien zeichnen sich durch den Grundsatz aus, ein komplexes, schwingendes System oder Objekt in mehrere Unterstrukturen, sogenannte Moden (engl. modes) zu unterteilen und diese anschließend jeweils gesondert zu betrachten. Die Schwingungen dieser einzelnen Moden sind durch die Unterteilung sehr simpel: Sie besitzen meist eine bestimmte Grundfrequenz (die Resonanzfrequenz der Mode), einen Dämpfungsfaktor, welcher wiederum die Abklingzeit definiert und eine Amplitude, welche von Art und Ort der Anregung des Systems abhängt. Die Summe der einzelnen, einfachen Schwingungen aller Moden ergeben wiederum die Schwingbewegung des gesamten angeregten Objekts. Die Gesamtanzahl solcher Moden ist im Vergleich zu einem wie oben besprochenen Masse-Feder-Modell relativ klein (für ein modales Modell einer schwingenden Saite muss man nach (Roads 1996) mit ca. 100 Moden rechnen).

Bei der Modalsynthese wird, ähnlich der spektralen Modelle, der erzeugte Klang eher aus der "spektralen" Perspektive betrachtet – so kann etwa die Gesamtschwingung angepasst werden, indem die einzelnen Modenschwingungen in ihrer Frequenz oder anderer Parameter verändert werden. Im Gegensatz dazu steht die bei den meisten physikalischen Modellen übliche Herangehensweise, veränderbare Parameter eher in Form von physikalischen Größen der Instrumententeile wie etwa Dicke, Spannung etc. bereitzustellen. Dies kann für die Modalsynthese sowohl als Vor- oder Nachteil gesehen werden: Einerseits ist diese Art der Modellierbarkeit durch ihre Nähe zu "traditionellen" digitalen Synthesetechniken wie subtraktiver oder additiver Synthese für viele Nutzer oft vertraut und intuitiv, allerdings ist eine direkte Steuerung der klangformenden "mechanischen" Parameter des modellierten realen Instruments hier nicht möglich.

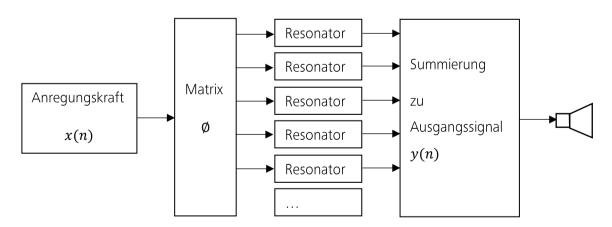


Abbildung 13: Prinzip der Modalsynthese nach (Kees van den Doel und Dinesh K. Pai 2003, S. 1)

Die Modalsynthese wurde erstmals von Adrien (Adrien und De Poli 1991) vorgestellt und dabei vor allem am IRCAM in Paris erforscht und weiterentwickelt. Adriens Methodik war Grundlage für die im gleichen Zuge entwickelte Software MODALYS (anfangs MOSAIC), welche bis heute zu den bekanntesten Vertretern der zur Modalsynthese verwendeten Frameworks zählt. In Adriens Arbeit werden die als Moden bezeichneten Unterstrukturen eines Resonators in Frequenzwert, Bandbreite und Dämpfungskoeffizient der jeweiligen Modenschwingung sowie der jeweiligen physischen Form der Unterstruktur definiert. Es wird davon ausgegangen, dass eine von außen auf ein Objekt wirkende Anregungskraft (durch Anschlagen, Zupfen etc.) eine am Kontaktpunkt übertragene, und sich durch das Objekt ausbreitende Störung bewirkt. Dies führt zur Schwingungsbewegungen des Systems, welche schließlich an der Oberfläche des Objekts Schallwellen emittiert (vgl. van den Doel und Pai 2003, S. 1).

Wie in Abbildung 13 dargestellt, wird die zuvor modellierte Anregungskraft x(n), welche an einem bestimmten Punkt auf das Objekt trifft, als Eingangssignal des Systems in die Matrix gegeben. Diese verteilt die Kraft abhängig vom Ort der Moden im System auf eine Reihe parallel geschalteter Resonatoren. Die Resonatoren simulieren jeweils die einzelnen Modenschwingungen des Systems. Sie besitzen eine bestimmte Resonanzfrequenz, Bandbreite, Dämpfung und Anfangsamplitude. Das Summensignal aller Resonatoren wird schließlich zusammengefasst und kann als Schwingung des Systems als Folge der Anregungskraft behandelt werden.

Die Aufteilung und die jeweiligen Eigenschaften der Moden können auf verschiedene Weisen ermittelt werden. Oft geschieht dies analytisch durch verschiedene Messungen der Schwingungen eines Systems. Die "modale Analyse" eines komplexen, schwingungsfähigen Systems ist eine häufig angewandte Strategie zur Ermittlung von Materialdaten, bspw. in Maschinen- oder Anlagenbau. Daher kann hier auf sehr gut ausgearbeitete und effiziente Methoden zurückgegriffen werden. Die modalen Eigenschaften eines Musikinstruments können auch durch die Analyse einer Klangaufnahme des impulsartig angeregten (linearen) Instruments ermittelt werden.

Die Modalsynthese ist insofern sehr vorteilhaft, als dass sie in der Lage ist, nach dem immer gleichen Prinzip jegliche Art von schwingenden Systemen zu beschreiben. Adrien definiert die momentane Auslenkungsgeschwindigkeit am Punkt k eines Systems in (Adrien und De Poli 1991) wie folgt:

$$\frac{\partial y_{k,t+1}}{\partial t} = \sum_{m=1}^{N} \Phi_k^m \frac{\sum_{l=1}^{P} \Phi_l^i F_{l,t+1}^{ext} + \frac{\partial \varphi_{m,t}}{\partial t} \frac{1}{\Delta t} - \omega_m^2 \varphi_{m,t}}{\frac{1}{\Delta t} + 2\omega_m \xi_m + \omega_m^2 \Delta t}$$
(38)

wobei  $\Phi_k^m$  der "Beitrag" der m-ten Mode zur gesamten Auslenkung am betrachteten Punkt k und  $F_{l,t+1}^{ext}$  die aktuell am Punkt l auf das System wirkende Kraft darstellen.  $\omega_m$ ,  $\xi_m$  und  $\varphi_m$  bezeichnen jeweils Kreisfrequenz, Dämpfungskoeffizienten und die Phasendifferenz der m-ten Mode.

Der zugegebenermaßen auf den ersten Blick recht kompliziert wirkenden Gleichung (38) können wir also entnehmen, dass wenn alle momentan auf das System wirkenden Kräfte sowie die zuvor analytisch bestimmten Eigenschaften der Moden bekannt sind, wir zu jeder Zeit an jedem Punkt k des Systems die momentane Auslenkungsgeschwindigkeit berechnen können. Aus dieser kann wiederrum ein Klang synthetisiert werden. Auch wenn die in den Algorithmen für eine Modalsynthese durchgeführten Berechnungen meist komplexer sind, demonstriert Adriens Gleichung das allgemeine Prinzip der Modalsynthese anschaulich.

### 4.4. Source-Filter-Modelle

Bei den Source-Filter-Modellen als Paradigma der Erstellung physikalischer Modelle handelt es sich im Prinzip um eine Interpretation einiger Synthesemodelle der u.a. in 2.1.1 besprochenen, subtraktiven Synthese als physikalische Modelle. Grob kann jedes Modell, das einen aktiven Erreger und als Resonator fungierendes, nachgeschaltetes (Filter-)System besitzt, welches das Erregersignal bearbeitet, als Source-Filter-Modell bezeichnet werden. Bei der "klassischen" subtraktiven Synthese ist dies durch einen eine Wellenform ausgebenden Oszillator als Erreger und die nachfolgende Schaltung bestehend aus Hüllkurvengeneratoren, Filtern, etc. als das Signal bearbeitendes System gegeben. Wie bereits erwähnt wird der Terminus "subtraktive Synthese" meist gleichbedeutend für die Source-Filter-Synthese und damit möglicherweise auch Source-Filter-Modellierung verwendet, vermutlich um im entsprechendem Kontext der additiven Synthese entgegenzustehen. Streng genommen impliziert der Begriff "subtraktive Synthese", dass der "Filterblock" der Schaltung rein subtraktiv arbeitet. Dies ist allerdings nicht bei allen Source-Filter-Modellen der Fall, weshalb in der Fachliteratur meist der Begriff Source-Filter-Synthese oder Source-Filter-Modell genutzt wird.

Passendes Beispiel für ein Source-Filter-Modell, das als physikalisches Modell interpretiert werden kann, ist das von Tolonen entwickelte und in Kapitel 2.1.1 bereits vorgestellte Modell zur Sprachsynthese. Wie beschrieben, modelliert dabei ein Filter die Resonanzeigenschaften des menschlichen Vokaltraktes. Es besteht also eine nachvollziehbare Korrespondenz zwischen der Filterstruktur des Modells und der physikalischen Struktur des abzubildenden Systems (in diesem Fall dem menschlichen Vokaltrakt). Auch Musikinstrumente sind theoretisch auf diese Weise modellierbar. Um jedoch Rechenaufwand und damit Kosten in Grenzen zu halten, eignet sich die Source-Filter-Methode dabei allerdings wie besprochen eher für wenig- bis nicht-zeitveränderliche (zeitinvariante) Resonanzsysteme, wie sie beispielsweise bei altertümlichen, traditionellen Instrumenten zu finden sind (vgl. Tolonen et al. 1998, S. 23). Auch der in 2.2.2 vorgestellte Karplus-Strong-Algorithmus kann als physikalisch modelliertes Source-Filter-Modell interpretiert werden.

### 4.5. Digitale Wellenleiter

Bei der Klangsynthese mit digitalen Wellenleitern (engl. digital waveguides), der *Wellenleitersynthese*, wird die Ausbreitung von Wellen in einem ein- oder mehrdimensionale Trägermedium mithilfe von Verzögerungsleitungen (engl. delay lines) modelliert. Dieses Paradigma ist in seiner Implementierung sehr effizient und kostengünstig. Daher besitzt die Technologie vor allem für Saitenmodelle höchste Relevanz im Bereich des Physical Modelling. Lange war die Wellenleitersynthese die einzige Synthesemethode der physikalischen Modelle, welche aufgrund ihrer enormen Effizienz im Bereich der Saiteninstrumente auf handelsüblichen Computern brauchbare Ergebnisse erzielen konnte. Als Pionier der Technologie kann zweifelsfrei Julius O. Smith III genannt werden. Er forscht und entwickelt seit ca. 30 Jahren am CCRMA der Universität Stanford im Bereich des Physical Modelling und spezialisierte sich dabei auf die Wellenleitersynthese. Von ihm stammen einige der wichtigsten und relevantesten Publikationen der Forschung im Bereich des Physical Modelling<sup>7</sup>. Zur Implementierung der erforschten Modelle wird dabei meist auf das STK<sup>8</sup> zurückgegriffen.

Die Wellenleitersynthese eignet sich besonders gut zur Simulation einer schwingenden Saite als eindimensionales Trägermedium. Es ist aber theoretisch auch möglich, zwei- oder dreidimensionale Systeme (Membran, Luftsäule innerhalb eines Rohres) mithilfe von digitalen Wellenleitern zu modellieren. Im Folgenden soll das Prinzip der digitalen Wellenleiter in einem eindimensionalen System am Beispiel einer schwingenden (Akustikgitarren-)Saite erläutert werden. Das gezeigte Modell stellt eine stark vereinfachte Form der Wellenleitersynthese dar und dient der Vermittlung der Grundlagen. Ein akkurat klingendes (Akustikgitarren-)Saitenmodell zur Implementierung in eine Instrumentensimulation müsste noch einige weitere klangbeeinflussende Faktoren berücksichtigen.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> https://ccrma.stanford.edu/~jos/

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Beim Synthesis Toolkit (STK) handelt es sich um eine Open Source Programmierschnittstelle in C++ für Echtzeit-Audiosynthese.

### 4.5.1. Wanderwellenlösung

Zum Verständnis der Wellenleitersynthese gilt es, sich zunächst mit der Wanderwellenlösung der in 3.4.1 besprochenen Wellengleichung zur Beschreibung einer idealen Saite vertraut zu machen.

Die allgemeine Wellengleichung ist gegeben durch

$$\epsilon \ddot{\mathbf{y}} = K \mathbf{y}^{"} \tag{39}$$

bzw.

$$\ddot{\mathbf{v}} = c^2 * \mathbf{v}'' \tag{40}$$

$$mit c = \sqrt{\frac{\kappa}{\epsilon}}$$

Nach dem Ansatz von D'Alembert von 1747 kann die Wellengleichung gelöst werden, indem man die gesamte Schwingung der Saite, wie in Abbildung 14 dargestellt, als die Summe zweier sich in entgegengesetzte Richtung bewegende "Wanderwellen" interpretiert, die sich mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c bewegen:

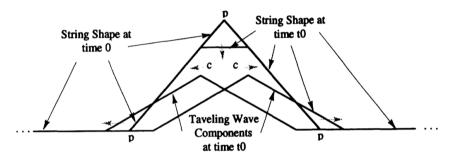


Abbildung 14: Wanderwellenlösung Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 75)

Die Position der sich nach rechts bewegenden Welle wird dabei durch  $y_r(x-ct)$  beschrieben, die der sich nach links bewegenden Welle durch  $y_l(x+ct)$ . Hierbei sind  $y_r$  und  $y_l$  beliebig differenzierbare Funktionen, sodass sich die allgemeine Klasse der Lösungen der Wellengleichung wie folgt als eine Summe der rechts- und linkslaufenden Teilwellen ausdrücken lässt (vgl. Smith, III 1992, S. 75):

$$y(t,x) = y_r(t,x) + y_l(t,x)$$
 (41)

Je nachdem, ob Ort oder Zeit die primär betrachtete Variable ist, wird die Wanderwellenlösung ausgedrückt durch:

$$y(x,t) = y_r(x-ct) + y_l(x+ct)$$
 (42)

$$y(t,x) = y_r(t - \frac{x}{c}) + y_l(t + \frac{x}{c})$$
 (43)

wobei für die Teilwellen  $\ddot{y}_r = c^2 * y_r''$  bzw.  $\ddot{y}_l = c^2 * y_l''$  gilt, sodass die Wellengleichung stets erfüllt ist.

#### 4.5.2. Randbedingungen der endlich langen Saite

Eine schwingende Saite in einem Musikinstrument besitzt eine endliche Länge und ist an beiden Enden fixiert. Die Enden der Saite liegen bei x=0 und  $x=L_{max}$ . Im Falle einer Gitarre beschreiben diese Punkte Sattel und Brücke des Instruments. Aus 4.1.2 ist bereits bekannt, dass die festen Enden der Saite zu einer Phasendrehung der Welle bei der Reflexion an den Saitenenden führen. Dies wird im einfachsten Fall mathematisch ausgedrückt durch Definition von:

$$y_r(t,0) = -y_l(t,0)$$
  
 $y_l(t,L) = -y_r(t,L)$ 
(44)

Im Wellenleitermodell kann dies, wie später in 4.5.4 beschrieben, durch Zuschaltung diverser Bauteile simuliert werden.

### 4.5.3. Diskretisierung der Wanderwellen

Um das Wanderwellenmodell in eine Computersimulation zu implementieren, muss es in zeitlicher und räumlicher Dimension diskretisiert werden. Die Größe der zeitlichen Samplingintervalle ist bei den Computerprogrammen meist durch eine bestimmte zeitliche Samplingrate (z.B. 44,1kHz, 48kHz oder 96kHz) festgelegt. Die Größe der räumlichen Samplingintervalle wird nun so definiert, dass sich die Wanderwellen, welche sich mit der Geschwindigkeit c ausbreiten, in einem zeitlichen Samplingintervall um genau ein räumliches Samplingintervall bewegen. Sei t ein zeitliches Samplingintervall und t ein räumliches Samplingintervall, so gilt:

$$X = c * T \tag{45}$$

So kann, wie bereits bei den Finite-Differenzen-Methoden angewandt, ein Austausch der Variablen für Ort und Zeit vorgenommen werden.

$$x \to x_k = kX$$

$$t \to t_n = nT$$
(46)

wobei gilt  $k, n \in \mathbb{Z}$  mit n als digitalen Zeitindex und k als digitalen Ortsindex.

Eingesetzt in die Wanderwellenlösung aus (43) und unter Berücksichtigung von (45) ergibt sich

$$y(t_n, x_k) = y_r \left( t_n - \frac{x_k}{c} \right) + y_l \left( t_n + \frac{x_k}{c} \right)$$

$$= y_r \left( nT - \frac{kX}{c} \right) + y_l \left( nT + \frac{kX}{c} \right)$$

$$= y_r [T(n-k)] + y_l [T(n+k)]$$
(47)

Die Gleichung (47) kann vereinfacht werden durch Festlegung von

$$y_r(n) = y_r(nT)$$

$$y_l(n) = y_l(nT)$$
(48)

sodass gilt:

$$y(n,k) = y_r[T(n-k)] + y_l[T(n+k)]$$
(49)

### 4.5.4. Digitale Wellenleiter und Verzögerungsleitungen

Bei der Wellenleitersynthese wird der Wellenleiter<sup>9</sup> durch eine Verzögerungsleitung (engl. delay line) modelliert. Diese Verzögerungsleitung setzt sich aus mehreren sog. Einheitsverzögerern (engl. delay unit, Symbol:  $z^{-1}$ ) zusammen, welche jeweils ein Eingangssignal um die Dauer eines zeitlichen Samplingintervalls T verzögert ausgeben. Eine Verzögerungsleitung gibt also wiederum ein Eingangssignal um eine bestimmte Anzahl an Samples, nämlich die Anzahl der in der Verzögerungsleitung enthalten Einheitsverzögerern verzögert aus.

Die Wanderwellenlösung, und damit das physikalische Verhalten einer Saitenbewegung kann mithilfe von zwei gekoppelten Verzögerungsleitungen simuliert werden. Dabei simuliert eine Verzögerungsleitung die sich nach rechts, die zweite Verzögerungsleitung die sich nach links bewegende Wanderwelle. Aus dem jeweils an einem Punkt der zwei Einheitsverzögerern gemessenen Summensignal der beiden Verzögerungsleitungen ergibt sich schließlich als Gesamtausgabewert die Auslenkung der Saite.

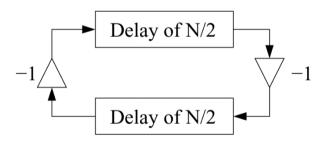


Abbildung 15: Einfaches Wellenleitermodell für eine ideale Saite mit Phasendrehung an den Saitenenden. Quelle: https://ccrma.stanford.edu/realsimple/wavequideintro/wavequideintro.pdf

Abbildung 15 zeigt als Blockdiagramm eine stark vereinfachte Form des Wellenleitermodells für eine schwingende Saite. Die obere Verzögerungsleitung führt die nach rechts wandernde Teilwelle, die untere Verzögerungsleitung die sich nach links bewegende Teilwelle. Jede Verzögerungsleitung hat eine Länge von N/2 Samples, sodass die gesamte Dauer eines einmaligen Umlaufs der Schleife N Samples oder N\*T Sekunden beträgt. An den Enden der Verzögerungsleitungen wird durch

.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Ein Wellenleiter ist grundsätzlich jedes Medium, in welchem eine Welle geführt werden kann

Zuschaltung eines Verstärkerelements (engl. gain blocks), welches den Wert des Signals um -1 multipliziert, die Phasendrehung der Welle simuliert.

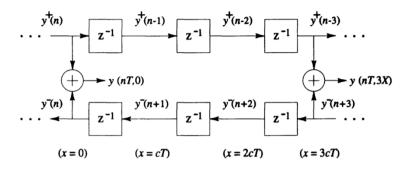


Abbildung 16: Simulation der idealen Saite mit Messstellen an den Punkten x=0 und x=3X=3cT.

Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 76)

Abbildung 16 zeigt die signalverarbeitungstechnische Darstellung am Beispiel der Simulation einer idealen, verlustlosen Saite. An den Punkten x=0 und x=3X=3cT wird der jeweils aktuelle Wert der Verzögerungsleitungen gemessen und durch Summierung der Gesamtausgabewert nach (49) gebildet.

### 4.5.5. Implementierung von Dämpfung

Statt wie bspw. bei den Finite-Differenzen Methoden Dämpfung in die partielle Differentialgleichung zu implementieren, wird bei der Wellenleitersynthese die Modellierung der frequenzabhängigen und frequenzunabhängigen Dämpfung durch zwischen die Verzögerungsleitungen (oder auch zwischen die einzelnen Verzögerungselemente) geschaltete Filterkomponenten realisiert.

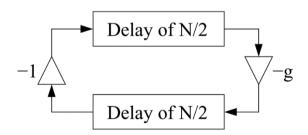


Abbildung 17: Einfaches Wellenleitermodell für eine verlustbehaftete Saite. Quelle: https://ccrma.stanford.edu/realsimple/wavequideintro/wavequideintro.pdf

Abbildung 17 zeigt ein einfaches Wellenleitermodell einer schwingenden Saite, in dem durch Zuschaltung des (in diesem Fall als Dämpfungselement fungierenden) Verstärkerblocks g eine Dämpfung der Saitenschwingung implementiert wird. Statt um -1 wird das Signal hier um den Faktor -g multipliziert, wobei |g| < 1 gilt. In akkurateren Modellen kann auch zwischen jedes der einzelnen Verzögerungselemente ein solcher Verlustkoeffizient g geschaltet werden, was allerdings eine deutlich höhere benötigte Rechenleistung des Modells nach sich zieht. Für dieses Beispiel soll der Fall eines

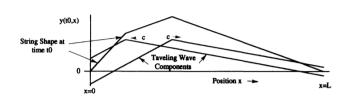
vereinfachten Wellenleitermodells mit nur einem zwischen den beiden Verzögerungsleitungen geschalteten Verlustkoeffizienten betrachtet werden. Der Wert von g wird aus den in 3.4.2 beschriebenen Termen der Saitendämpfung ermittelt. Eine genauere Beschreibung dessen wird in (Smith, III 1992) erläutert.

Um eine frequenzabhängige Dämpfung zu simulieren (bei Saiteninstrumenten erfahren hohe Frequenzen eine stärkere Dämpfung als niedrige) kann im einfachstem Fall dem Verlustkoeffizienten g schlicht ein einfacher Tiefpass-Filter zugeschaltet werden. In einfachen Wellenleitermodellen wird zur Implementierung frequenzabhängiger Verluste der die frequenzunabhängige Dämpfung beschreibende Verlustkoeffizient g komplett durch einen linearen, zeitinvarianten Filter ersetzt. Dessen Frequenzantwort enthält die in 3.4.2 beschriebenen Terme zur Beschreibung frequenzabhängiger Verluste einer schwingenden Saite.

Aufgrund von Dispersion breiten sich innerhalb der Saite hochfrequente Anteile des Signals schneller aus als niederfrequentere. Dies wird im Wellenleitermodell durch Integration eines Allpassfilters in die Schaltung simuliert, welcher die gesamte Dispersion an einem Punkt in der Schleife zusammengefasst simuliert. Ausgereiftere Wellenleitermodelle sind also in der Lage, frequenzabhängige Dämpfung und Dispersion durch Zuschaltung von Filterkomponenten zu implementieren. Der mathematische Hintergrund zur Berechnung dieser Filter ist relativ komplex, sodass an dieser Stelle von einer weiterführenden Erläuterung abgesehen wird.

#### 4.5.6. Anregung und Klangsynthese

Die simulierte Saite lässt sich auf verschiedene Arten zu einer Schwingungsbewegung anregen. Die meist verbreiteten Anregungsmechanismen im Bereich der Saiteninstrumente sind dabei Zupfen (Gitarre), Schlagen (Klavierhammer) und Streichen (Streichinstrumente). Im einfachsten Fall wird die Saite lediglich in einen bestimmten Anfangszustand versetzt. Die daraufhin wirkenden Rückstellkräfte sorgen für die Schwingung der Saite. Dabei legen die Art der Anfangsauslenkung, also die Position y(0,x) und die Anfangsgeschwindigkeit v(0,x) in Verbindung mit den gegebenen Eigenschaften des Saitenmodells die resultierende Bewegung fest (vorausgesetzt es existiert keine weiterer von außen wirkender Erregermechanismus) (vgl. Smith, III 1992, S. 82). Eine gezupfte Saite besitzt im idealisierten Fall zum Anfangszeitpunkt  $t_0$  eine Auslenkung  $y(0,x) \neq 0$  und eine Anfangsgeschwindigkeit v(0,x) = 0.



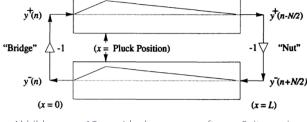


Abbildung 19: Fest eingespannte, ideale Saite kurz nach dem Zupfen. Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 82)

Abbildung 18: Ideale, gezupfte Saite im Wellenleitermodell. Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 82)

Abbildung 19 zeigt den Zustand einer gezupften, fest eingespannten Seite kurz nach dem "Loslassen" als Superposition der beiden Wanderwellenkomponenten. Die negativen Auslenkungsbereiche der Wanderwellen können dabei als invertierte Reflexionen an den Saitenenden betrachtet werden. In Abbildung 18 ist schematisch die gezupfte Saite in ihrer "Ausgangsposition" im Wellenleitermodell dargestellt<sup>10</sup>.

Oft wird zur Klangsynthese mithilfe eines physikalischen Modells eine Berechnung der Schwingung an einem oder mehreren bestimmten Punkten am simulierten Instrument durchgeführt. Bei einer schwingenden Saite stellt sich früher oder später natürlich die Frage, an welchem Punkt der momentane Wert der Saitenauslenkung<sup>11</sup> gemessen werden soll, um zu einem möglichst authentischen Ergebnis zu kommen. Dies hängt oft von der Art des zu simulierenden Instruments ab. Bei einer elektrischen Gitarre orientiert man sich bspw. an der Position des Tonabnehmers einer echten E-Gitarre. Bei einer akustischen Gitarre macht es Sinn, die Schwingung möglichst nach an der Brücke zu messen, da vor allem hier im "realen" Fall die Saitenschwingung auf den Gitarrenkorpus übertragen wird.

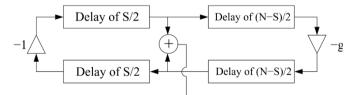


Abbildung 20: Einfaches Wellenleitermodell mit "Auslenkungssensor". Quelle: https://ccrma.stanford.edu/realsimple/waveguideintro/waveguideintro.pdf

Abbildung 20 veranschaulicht ein einfaches Wellenleitermodell, an dem an einer Position y(nT,SX) (welche sich somit S\*Xm vom linken Saitenende aus entfernt befindet) der Wert der beiden Verzögerungsleiter gemessen und aus deren Summe die aktuelle Saitenauslenkung berechnet wird.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Die Simulation solch "scharfer" Ecken wie in der Abbildung ist so nicht möglich, hierfür wäre eine unendliche Bandbreite nötig und es würde beim Abtasten zu Aliasing Effekten kommen. Die Beliebigkeit der Saitenform ist daher durch eine vorherige Bandbegrenzung des Spektrums des Signals auf die halbe Samplingrate begrenzt.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Anmerkung: Es ist auch möglich (und geläufig), statt der Saitenauslenkung etwa Geschwindigkeit oder Beschleunigung am beobachteten Punkt auszulesen.

### 4.6. Sonstige

#### 4.6.1. Wellendigitalfilter

Wellendigitalfilter (engl. Wave Digital Filter) sind digitale Filter, welche vorrangig in der digitalen Signalverarbeitung eingesetzt werden. Sie wurden ursprünglich in den späten 1960er Jahren von Alfred Fettweis entwickelt, um das Verhalten von Schaltelementen analoger, linearer, passiver Netzwerke wie Kondensatoren, Induktivitäten, elektrischer Widerstände usw. einzeln in kompakten, digitalen Netzwerken innerhalb des Filters zu simulieren. Dieses Prinzip der Digitalisierung (Diskretisierung) analoger Zustände kann nun übertragen und zur Erstellung von Simulationen physikalischer Systeme (wie dem eines Musikinstruments) genutzt werden, dessen Parameter den Filterkoeffizienten des Wellendigitalfilters entsprechen. Die einzelnen Verzögerungselemente des Wellendigitalfilters simulieren dabei jeweils den aktuellen Zustand eines Massen- oder Federelements des modellierten physikalischen Systems. Diese Technik ist im Vergleich zu den vorhergehend vorgestellten Modellen als Technik zur physikalischen Modellierung noch relativ jung und wenig beschrieben.

### 4.6.2. Hybridmodelle

Jedes der vorgestellten Paradigmen besitzt bestimmte Vor- und Nachteile. Somit ist es naheliegend, im Rahmen der Möglichkeiten Hybridmodelle zu entwickeln, welche die Stärken verschiedener Modelle miteinander kombinieren. Allgemein, vor allem aber in der Beschreibung derartiger Hybridmodelle wird in der Betrachtung der verschiedenen physikalischen Modelle oft eine Unterscheidung von K-Modellen und W-Modellen angewandt. Die K-Modelle umfassen diejenigen Methoden, welche zur Modellierung "K-Variablen<sup>12</sup>" nutzen, bspw. physikalische Größen wie Kraft, Masse, Widerstand, Spannung usw. Masse-Feder-Netzwerke, modale Modelle und Finite-Differenzen-Methoden zählen zu den K-Modellen. Im Gegensatz dazu stehen die W-Modelle, welche die W-Variablen<sup>13</sup> nutzen, also physikalische Variablen, die zur Beschreibung von Wellen genutzt werden. Ein Beispiel für W-Methoden sind die digitalen Wellenleiter. Hybridmodelle entstehen vor allem bei einem modularen Aufbau des physikalischen Modells: Anstatt allumfassend das komplette Verhalten eines musikalischen Objekts (z.B. einer Saite) anhand eines Paradigmas zu simulieren, kann heutzutage oft eine Verschaltung mehrerer Objekte, welche verschiedene Teile oder Prozesse simulieren, durchgeführt werden (vgl. Bilbao 2007, S. 17). So entstehen "gemischte" K-W-Modelle, bspw. aus Wellendigitalfiltern und digitalen Wellenleitern wie in (Karjalainen 2003), oder digitalen Wellenleitern und Finite-Differenzen-Methoden, welche unter anderem in (Erkut und Karjalainen 2004) besprochen werden.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Das ,K' bezieht sich dabei auf die Kirchhoffschen Gesetze

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Das ,W' bezieht sich dabei auf "Welle" (engl. wave)

### 4.7. Fazit

In Kapitel 3 und 4 wurde eine umfassende Heranführung an die Grundprinzipien des Physical Modelling zur Klangsynthese gegeben. Nach Erklärung der Grundlagen von PM-Synthese und relevanten "Werkzeugen" wurden die wichtigsten Paradigmen zur Erstellung physikalischer Modelle zu Klangsynthesezwecken vorgestellt und dem Leser beispielhaft erläutert. In sinnvoller Weise abschließend einen direkten Vergleich zwischen den Paradigmen zu ziehen, ist nur schwer möglich, da diese sich in ihrer grundsätzlichen Herangehensweise oft zu sehr unterscheiden. Naheliegender ist es, die Methoden einzeln zu betrachten und auf ihre Vor- und Nachteile zu prüfen.

Finite-Differenzen-Modelle lösen physikalische Modelle beschreibende partielle Differentialgleichungen durch Approximation mithilfe endlicher Differenzengleichungen. Dabei werden die Modelle durch Diskretisierung der zeitlichen und örtlichen Dimension auf ein bestimmtes "Raster" näherungsweise beschrieben. Großer Vorteil ist die allgemeine Anwendbarkeit der Methode, da sie auf jegliche, ein schwingendes ein-, zwei- und dreidimensionales System beschreibende partielle Differentialgleichung gleichermaßen angewandt werden kann. Durch die "Nähe" zum mathematischen Modell kann direkt auf dessen Parameter (hier handelt es sich meist um die physikalischen Eigenschaften des modellierten Instruments) zugegriffen werden. Nachteil von Finite-Differenzen-Methoden ist ihre vergleichsweise schlechte Effizienz im Hinblick auf die nötige Rechenleistung, was sich vor allem bei komplexeren Modellen bemerkbar macht. Erst seit wenigen Jahren sind handelsübliche Computer leistungsfähig genug, auf Grundlage von Modellen dieser Methode in Echtzeit Klang zu synthetisieren.

Bei den Masse-Feder-Netzwerken werden schwingende Strukturen akustischer Systeme als mechanische Systeme bestehend aus Masse-, Feder- und Dämpfungselementen modelliert. Dabei werden die Partikel des Systems einmalig in ihren Eigenschaften definiert. Großer Vorteil dieses Paradigmas ist neben einer allgemeinen Anwendbarkeit wie erwähnt die Möglichkeit, komplexe Schwingungsbewegungen zu simulieren, ohne deren genaue Beschreibung zu kennen. Lediglich durch Festlegung der Materialkonstanten der Partikel und Definition ihres Verhaltens auf Grundlage physikalischer Gesetze können damit physikalisch stimmige Verhaltensweisen der als mechanische Strukturen modellierten akustischen Systeme dargestellt werden. Allerdings sind Masse-Feder-Netzwerke nur begrenzt zur akkuraten Modellierung jeglicher Teile eines Instruments geeignet – das Interesse der Entwickler derartiger Systeme liegt meist eher in der Interaktionsmöglichkeiten, als in der besonders genauen Simulation komplexer akustischer Systeme. So eignen sich Modelle dieses Paradigmas eher zur (experimentellen) Nutzung von Klangkünstlern und Komponisten, als zur wissenschaftlich motivierten Modellierung realer Musikinstrumente (vgl. Bilbao 2009, S. 9).

Die *Modalsynthese* oder andere modale Modelle beschreiben schwingende Systeme durch Unterteilung in mehrere schwingende Unterstrukturen (Moden). Die Moden reagieren auf externe Anregung des Systems durch Schwingung mit der Eigenfrequenz der Mode, deren Abklingzeit vom materialabhängigen Dämpfungsfaktor abhängig ist. Ähnlich wie die Finite-Differenzen-Methoden ist die Modalsynthese allgemein anwendbar. Jedes schwingende System (also im Prinzip jedes Musikinstrument) kann so als eine Summe schwingender Moden beschrieben werden. Aufgrund der Verbreitung der Technologie in anderem Bereichen kann zur Materialanalyse auf ausgereifte Methoden zurückgegriffen werden. Allerdings ist ein Zugriff auf die klangformenden physikalischen Parameter des modellierten Instruments kaum möglich. Die Klangformung erfolgt (in weitem Sinne vergleichbar mit der additiven Synthese) über einen Eingriff in die durch parallel geschaltete Resonatoren simulierten schwingenden Moden.

Source-Filter-Modelle bezeichnen in diesem Kontext eine Schnittmenge aus spektralen und physikalischen Modellen. Sie werden meist durch einen als Erreger modellierten Signalgenerator und einem den Resonator modellierenden Filter realisiert. Eine typische Modellierung in Form von Erregersignal und zeitvarianten Filter kann nur für wenige nachzuahmende Instrumente bei vertretbarem Rechenaufwand durchgeführt werden. Eine Veränderung der Parameter ist hier nur in Form der Modifikation des Erregersignals sowie der Koeffizienten des Filters möglich. Eine direkte Verbindung zu den physikalischen Parametern der Instrumente besteht hier kaum. Source-Filter-Modelle in der Welt des Physical Modelling existieren hauptsächlich in Form von eigenständigen, jenseits der systematischen Forschung entwickelten Modellen wie bspw. dem Karplus-Strong-Algorithmus.

Die Wellenleitersynthese zählt zu den populärsten Methoden in der physikalischen Modellierung von Musikinstrumenten zur Klangsynthese, vor allem im Bereich eindimensionaler Systeme. Unter Verwendung eines digitalen Wellenleiters wird auf Grundlage der Wanderwellenlösung der Wellengleichung ein Modell geschaffen, das Grundlage für viele erfolgreiche effiziente Simulationen von Saiten- oder Blasinstrumenten ist. Die Parameter eines Wellenleitermodells stehen teilweise in enger Verbindung mit der physikalischen Struktur des modellierten Instruments.

Allgemein findet eine Implementierung der jeweiligen Modelle oft in eigens geschaffenen Softwareumgebungen statt (siehe CORDIS, MODALYS etc.). Generell ist für viele Methoden eine Implementierung in C++ oder C-Software bspw. unter Verwendung des STK möglich. Neben der Verwendung von DSP- oder FPGA-Plattformen wird aktuell bspw. im Zuge des NESS- Projekts, siehe (University of Edinburgh) der Einsatz von GPUs (Grafikkarten) erprobt. Abschließend soll nun auf den aktuellen Status von Physical Modelling als Klangsynthesestrategie eingegangen werden.

### 5. Status

### 5.1. Kommerzielle Anwendung

Trotz Vorhersagungen einer großen Zukunft für die Klangsynthesestrategie sind auf Physical Modelling basierende, virtuelle Instrumente auf dem derzeitigen Markt noch relativ rar gesät und zahlenmäßig den Samplinginstrumenten klar unterlegen.

Ein aktuelles "State of the Art"-Modell der "Königsdisziplin", den Klavier-Simulationen, stellt die aktuelle Version 6 des Programms "Pianoteg" der Firma MODARTT dar. Hier wird eine große Bandbreite an akustischen und elektrischen Pianos als in Echtzeit spielbare, virtuelle Instrumente simuliert. Nach Angaben des Herstellers handelt es sich bei Pianoteq um das "erste komplett (physikalisch) modellierte" Piano auf dem Markt. Pianoteq wird innerhalb der Community als erstes, den Samplingmodellen mindestens ebenbürtiges Klaviermodell angesehen. Im Gegensatz zu den Samplinginstrumenten gibt es hier viele, bisher in derartigen virtuellen Instrumenten kaum vorhanden gewesene, formbare Parameter zur Veränderung der Klangcharakteristik: So kann bspw. die Saitenstimmung des Klaviers genauestens modifiziert werden (wobei sogar verschiedene Raumtemperaturen simuliert werden können), die für die Brillanz des Klangs verantwortliche Hammerhärte eingestellt werden, jeweilige Obertonstruktur und Resonanzeigenschaften angepasst oder gar der Anschlagspunkt der Saiten verändert werden. Außerdem gibt es eine stufenlose (einzig durch das MIDI-Protokoll auf 127 Dynamikstufen begrenzte) Einstellung der Anschlagsstärke. Mit dem "MODO BASS" von IK Multimedia wurde erstmals eine ansprechende, komplett physikalisch modellierte E-Bass Simulation entwickelt. Hier wurde auf Grundlage der Modalsynthese ein gut modifizierbares Modell geschaffen: Für 14 Bassmodelle kann der Klang unter anderem durch Änderung der Tonabnehmerart und -position, Saitenart, -dicke, -alter oder -stimmung angepasst werden. Auch die verschiedenen Arten der Interaktion des Musikers sind aufwendig und genau in Hinsicht auf die beim Bassspiel üblichen, unterschiedlichen Spielarten modelliert. Das "SWAM-S" (Synchrounous Waves Acoustic Modeling-Strings) Software-Paket der Firma Audio Modelling bietet eine auf Grundlage einer Weiterentwicklung der Wellenleitersynthese komplett physikalisch modellierte Simulation von Streichinstrumenten. Hier wurde bei der Modellierung besonderen Wert auf die Echtzeitkontrollierbarkeit der Anregung in Form von Bogengeschwindigkeit, -position und -druck und Spielarten wie Portamento, Vibrato, Tremolo, Pizzicato usw. gelegt. Die im Bereich des Physical Modelling seit langer Zeit aktive Firma Applied Acoustic Systems (AAS) bietet aktuell neben dem "Lounge Lizard" als pyhsikalisch modellierte Simulation elektrischer Pianos den "Strum" Synthesizer, welcher verschiedene akustische und elektrische Gitarren modelliert. Außerdem wird mit dem "Chromaphone" ein eher experimenteller Physical Modelling-Synthesizer für perkussive Klänge geboten, der auch in der Lage ist, reale Instrumente zu imitieren. Diesem experimentellen Ansatz folgen auch die Modelle "String Studio" (streicherähnliche Klänge) und "Ultra Analog" (Simulation analoger Synthesizer). Das jahrelange Flaggschiff-Produkt der Firma, der PM-Synthesizer "Tassman" wird nicht mehr vertrieben. Die meisten der aktuellen physikalisch modellierten Softwareinstrumente nutzen die Klangsynthesestrategie eher zur Schaffung neuer, experimenteller Klänge als zur spezifischen genauen Nachbildung eines realen Instruments. Zu den aktuell populärsten Vertretern zählen hier oben genanntes "Cromaphone" von AAS, der "PA3 Derailer" von Physical Audio oder Logics PM-Synthesizer "Sculpture". Auch im Programm "Reaktor" der Firma Native Instruments ist eine Erstellung von Instrumenten nach dem Physical Modelling Prinzip möglich.

Die Technologie des Physical Modelling als Klangsynthesestrategie hat also nur sehr begrenzt Einzug in den aktuellen Markt der als Software-Synthesizer realisierten virtuellen Instrumente erhalten. Neben einigen Synthesizern, welche die Technologie eher experimentell zur Schaffung neuer Klangfarben nutzen, mangelte es lange an konkurrenzfähigen kommerziellen Produkten, deren Ziel in der möglichst akkuraten Nachahmung eines realen Instruments liegt. Erst seit kurzem existieren mit Pianoteq, MODO BASS und der SWAM-S Reihe ernstzunehmende Produkte, welche den auf dem Markt vorherrschenden Samplinginstrumenten Konkurrenz machen. Aufgrund ihrer großen Bandbreite an modifizierbaren Parametern und extrem realistischem Klang werden diese Modelle allerdings im Allgemeinen von Nutzern und Kritikern sehr positiv aufgefasst. Nach Angaben der Hersteller entstanden diese Instrumentenmodelle meist aus einer langwierigen, mehrjährigen Zusammenarbeit der Firma mit Projektteams einer Universität oder anderer Forschungseinrichtung.

### 5.2. Forschungstrends

Nach (Smith, III 1996) war man bereits Mitte der 1990er Jahre in der Lage, den Klang der meisten "relevanten" westlichen Instrumente weitestgehend zu simulieren. Nach wie vor werden derartige Instrumentenmodelle weiterhin entwickelt und optimiert. Das Ziel ist dabei meist die Schaffung einer möglichst akkurat und realistisch klingenden, in Echtzeit "spielbaren" und durch geeignete Parameter steuerbare und hinsichtlich einer Klangsynthese orientierten Instrumentensimulationen. Die Entwicklung solcher Modelle ist relativ langwierig, so gibt es wie in Kapitel 5.1 besprochen erst seit kurzem echtzeitfähige, kommerziell nutzbare Instrumentensimulationen, welche klanglich mit Sampling-basierten Modellen mithalten können. Auch abseits traditioneller Instrumente wird an Modellen zur Simulation historischer oder unkonventioneller Instrumente sowie nicht-musikalischen Klangobjekten (bspw. zur Nutzung im Gaming-Bereich) geforscht (vgl. Välimäki et al. 2006, S. 66). Größte Aufmerksamkeit gilt allerdings weiterhin dem Bereich der Optimierung von Modellen "konventioneller", populärer Musikinstrumente.

Ein mit dem Bereich der physikalischen Modellierung von Musikinstrumenten direkt in Verbindung stehendes Themengebiet ist die Erforschung der Eigenschaften und Grenzen der Klangrezeption des

Menschen. Hier geht es u.a. darum, welche im musikalischen Sinne wichtigen Informationen eines Klangs wahrgenommen werden. So können physikalische Modelle von Musikinstrumenten optimiert werden, indem für den Hörer unrelevante Klanganteile vernachlässigt werden.

### 5.3. Exkurs: Steuerung

Ein nicht zu vernachlässigender Umstand, dem es Beachtung zu schenken gilt, ist die derzeitig noch relativ geringe Auswahl an Arten von Controllern zur Steuerung der virtuellen Instrumente. Aktuell werden derartige Simulationen im kommerziellen Bereich meist mittels eines auf dem MIDI-Standard basierenden Controller in Form einer Klaviertastatur, einem sogenannten MIDI-Keyboard gesteuert. Zusätzlich zur einfachen Klaviatur bieten viele MIDI-Keyboards noch weitere Steuerungsmöglichkeiten: Ein Steuerrad ("Modulation Wheel") kann mit einer bestimmten Steuerfunktion versehen werden. Es wird meist zur Tonhöhenmodulation genutzt, um so Tonhöhen zwischen den Tönen der chromatischen Tonleiter spielbar zu machen (so können Spieltechniken wie das "pitch bending" bei Gitarren simuliert werden). Ein Pedal ("Sustain Pedal") übernimmt die Funktion des bei Klavieren üblichen Haltepedals, kann aber auch anderweitig zur Steuerung genutzt werden. Viele Keyboards besitzen eine sog. "Aftertouch"-Funktion, die es ermöglicht, nach dem Anschlag einer Taste über einen unter der Tastatur angebrachten Drucksensor Controller-Daten zu senden. Zusätzlich kann über einen "Breath Controller", einem per Atemdruck steuerbaren Drucksensor, ein beliebiger Parameter gesteuert werden.

Generell stößt man bei der Konzeption und Schaffung eines geeigneten Controllers aufgrund schier grenzenloser Möglichkeiten und Einschränkungen auf einige fundamentale Unklarheiten. Einerseits bietet es sich an, die Bedienung einer Instrumentensimulation möglichst nah am Spiel des "echten" Instruments zu halten, um ein realitätsnahes Spielerlebnis zu schaffen. Diesen Ansatz verfolgt man etwa im Bereich der E-Drums. Derartige virtuelle Instrumente könnten also vor allem als "Übungsersatz" der echten Instrumente dienen. Andererseits bringt es wiederum viele Vorteile, die Controller möglichst allgemein zu halten, um damit bspw. mehrere verschiedene Instrumente einer Instrumentengruppe auf gleiche Weise akkurat steuern zu können. Dieser Ansatz eignet sich besonders gut für Künstler, Produzenten oder sonstige Musikschaffende, die damit (möglicherweise auch live) eine viele verschiedene virtuelle Instrumenten steuern möchten. MIDI-Keyboards eigenen sich beispielsweise gut zur Steuerung von Tasteninstrumenten. Durch oben beschriebene, zusätzliche Erweiterungen ist damit auch die Steuerung von virtuellen Saiten-, Streich- oder Blasinstrumenten größtenteils möglich, jedoch bei weitem nicht optimal. Abgesehen von der Schaffung in höchstem Maße realistisch klingender Instrumentensimulation ist also auch die Entwicklung geeigneter Controller zur Steuerung der Modelle nötig. Ein erstrebenswerter Ansatz wäre hierbei etwa die Entwicklung eines auf eine bestimmte Instrumentengruppe zugeschnittenen, hinsichtlich der Technologien der verwendeten Simulationen angepassten, auf Latenzfreiheit und optimale Bedienbarkeit fokussierten Controllers.

### 6. Fazit

In dieser Arbeit wurde die Technik des Physical Modelling als Klangsynthesestrategie im Hinblick auf die Erstellung virtueller Simulationen realer Musikinstrumente besprochen. Es wurde zunächst ein Überblick über relevante, digitale Klangsynthesestrategien und ihre Eignung zur Simulation von Musikinstrumenten geschaffen. Anschließend folgte eine Heranführung an das Themengebiet des Physical Modelling. Dazu wurde ein Verständnis der grundlegenden Prinzipien der Thematik geschaffen und der Leser anschließend durch Erläuterung der Paradigmen in die Vorgehensweisen bei der Erstellung physikalischer Modelle eingeführt. Schlussendlich folgte eine Betrachtung des aktuellen Status der Klangsynthesestrategie,

Die physikalische Modellierung von Musikinstrumenten stellt im Bereich der Tontechnik nach wie vor ein besonders für die Forschung relevantes, großes und wichtiges Themenfeld dar und wird dies vermutlich auch in Zukunft bleiben. Physical Modelling schien sich vor allem in den 1990er Jahren im Bereich der virtuellen Instrumente zu einem sehr populären Trend zu entwickeln, was sich unter anderem in der enormen Menge der zu dieser Zeit vorgestellten neuen Modelle und wissenschaftlichen Artikel widerspiegelt. Letztere priesen dabei die physikalische Modellierung häufig als Klangsynthesestrategie der Zukunft an. Zu dieser Zeit war man erstmalig in der Lage, die meisten "wichtigen", populären Musikinstrumente in weitestgehend realistisch klingenden Simulationen abzubilden. Dies mag möglicherweise zu dem Eindruck verleitet haben, die Klangsynthesestrategie stünde kurz vor ihrem Durchbruch und man sei zeitnah in der Lage, auf Grundlage der Technologie virtuelle Instrumente mit höchst akkuratem Klang und großer Menge veränderbarer Parametern zu schaffen. Ca. 20 Jahre später wird der aktuelle Markt im Bereich der virtuellen Instrumente allerdings fast ausschließlich von Sampling-basierten Simulationen beherrscht. Hierfür mag es mehrere Gründe geben: Die Samplinginstrumente profitierten zum einen enorm von der deflationären Preisentwicklung und starken Qualitätssteigerung von Computerspeichersystemen. Die Entwicklung der Marktsituation ist also möglichweise nicht auf die schleppende Entwicklung der physikalischen Instrumentenmodelle zurückzuführen, sondern der enormen Steigerung von Qualität und Preis-/Leistungsverhältnis der Samplinginstrumente geschuldet. So konzentrierten sich die (natürlich wirtschaftlich orientierten) Produkthersteller in den letzten Jahren eher auf die Erstellung von hochqualitativen die unsichere Samplinginstrumenten, als in langwierige, Entwicklung Instrumentenmodelle zu investieren. Ein weiterer Umstand, der den Samplinginstrumente zugutekommt, liegt in der sehr allgemeinen Anwendbarkeit der Sampling-Technologie: Das Prinzip, Instrumente durch Aufnahme deren Einzeltöne zu modellieren und die Qualität der Modelle prinzipiell durch eine Erhöhung der Anzahl der Aufnahmen zu steigern, ist generell auf jegliche Art von Instrument mehr oder weniger gleichermaßen anwendbar. Im Gegensatz dazu stehen die Modelle des Physical Modelling: Hier muss für jedes Instrument ein eigenständiges und auf die jeweiligen Anforderungen

und Bedingungen angepasstes Modell entwickelt werden. Zwar können bestimmte Technologien gleichermaßen für mehrere Instrumente einer Gattung (gezupfte Saiteninstrumente, perkussive Instrumente, Streichinstrumente etc.) angewandt werden, oft unterscheiden sich aber die Herangehensweisen in der Erstellung der Modelle für verschiedene Instrumente ab einem bestimmten Punkt grundlegend. Dies führt schlussendlich dazu, dass die Entwicklung eines virtuellen Instruments auf Basis des Physical Modelling im Vergleich zu den Samplinginstrumenten deutlich langwieriger, teurer und auch risikobehafteter (es ist nicht klar ob man in einer bestimmten Zeit zum gewünschten Ergebnis kommt) gestaltet. Dennoch ist nicht zuletzt das Erscheinen konkurrenzfähiger, akkurater und neuartig modifizierbarer Instrumentensimulationen auf Grundlage physikalischer Modellierung in jüngster Vergangenheit ein Anzeichen für eine zu erwartende Etablierung des Physical Modelling im Bereich der virtuellen Instrumente. Es ist also durchaus weiterhin davon auszugehen, dass die Technologie des Physical Modelling als Klangsynthesestrategie langsam aber sicher die ihr vorausgesagte, hohe Relevanz und Wichtigkeit zur Modellierung hochakkurater Instrumentensimulationen erlangen wird.



## Symbolverzeichnis

Amplitude (m)Α С Geschwindigkeit (m/s)  $d_1, d_2, \xi$ Dämpfungskoeffizienten konstante, lineare Massendichte  $(N/m^2)$ ε f Frequenzvariable (*Hz*) F Kraft (N) Ι Streumassenradius eines Saitenquerschnitts (m) digitaler Ortsindex k konstante Saitenspannung (N) Κ Längenvariable (*m*) L Masse (kg)m digitaler Zeitindex n Phasendifferenz (*rad*) φ T zeitliches Samplingintervall (s) Kreisfrequenz (Hz) ω räumliches Samplingintervall (m) Χ Bereich der ganzen Zahlen  $\boldsymbol{z}$ 

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Subtraktive Synthese nach (Stefan Bilbao 2007, S. 6)
Abbildung 2: Signalflussdiagramm eines Source-Filter-Modells zur Stimmsynthese nach (T. Tolonen et
al., S. 22)5
Abbildung 3: Line-Segment Approximation der Hüllkurve eines Obertons nach (T. Tolonen et al., S. 20)
Abbildung 4:: Träger- und Modulationsschwingung, resultierende Schwingung. Quelle:
https://www.computerlanguage.com/results.php?definition=frequency+modulation9
Abbildung 5: Signalverarbeitung beim Karplus-Strong Algorithmus
Abbildung 6: Impulsantwort des Karplus-Strong Algorithmus. Quelle: (T. Tolonen et al., S. 11) 11
Abbildung 7: Zeitstrahl der digitalen Klangsynthesestrategien. Quelle: (Stefan Bilbao 2007, S. 2) 18
Abbildung 8: Die ideale, schwingende Saite. Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 2)
Abbildung 9: Repräsentation der eindimensionalen endlichen Differenzengleichung einer idealen Saite
auf einem Zeit-Ort-Raster. Quelle: (Matti Karjalainen 2002)
Abbildung 10: Blockdiagramm der Signalverarbeitung einer Finite-Differenzen-Approximation der
Wellengleichung zur Zeit n am Punkt k. Quelle: (Matti Karjalainen 2002)
Abbildung 11: Simples, eindimensionales mechanisches System bestehend aus zwei Massepunkten und
einer Feder. Quelle: (Vesa Välimäki et al. 2006, S. 15)
Abbildung 12: Basiselemente eines Masse-Feder-Netzwerks. Quelle: (Vesa Välimäki et al. 2006, S. 16)
35
Abbildung 13: Prinzip der Modalsynthese nach (Kees van den Doel und Dinesh K. Pai 2003, S. 1) 38
Abbildung 14: Wanderwellenlösung Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 75)
Abbildung 15: Einfaches Wellenleitermodell für eine ideale Saite mit Phasendrehung an den
Saitenenden. Quelle: https://ccrma.stanford.edu/realsimple/waveguideintro/waveguideintro.pdf 45
Abbildung 16: Simulation der idealen Saite mit Messstellen an den Punkten x=0 und x=3X=3cT. Quelle:
(Julius O. Smith III 1992, S. 76)
Abbildung 17: Einfaches Wellenleitermodell für eine verlustbehaftete Saite. Quelle:
https://ccrma.stanford.edu/realsimple/waveguideintro/waveguideintro.pdf
Abbildung 18: Fest eingespannte, ideale Saite kurz nach dem Zupfen. Quelle: (Julius O. Smith III 1992,
S. 82)
Abbildung 19: Ideale gezupfte Saite im Wellenleitermodell. Quelle: (Julius O. Smith III 1992, S. 82). 48
Abbildung 20: Einfaches Wellenleitermodell mit "Auslenkungssensor". Quelle:
https://ccrma.stanford.edu/realsimple/waveguideintro/waveguideintro.pdf

### Literaturverzeichnis

AAS Applied Acoustics Systems: Tech Talk. Physical Modelling. Online verfügbar unter https://www.applied-acoustics.com/techtalk/physicalmodeling/, zuletzt geprüft am 27.12.2018.

Adrien, J. M.; De Poli, Giovanni (1991): The missing link: modal synthesis. In: *Representations of musical Signals*, 269-298.

Bensa, J.; Bilbao, Stefan; Smith, Julius O., III (2003a): The simulation of piano string vibration: from physical models to finite difference schemes and digital waveguides. In: *J. Acoust.*, S. 1095–1107.

Bensa, Julien; Bilbao, Stefan; Kronland-Martinet, Richard; Smith, Julius O., III (2003b): The simulation of piano string vibration: From physical models to finite difference schemes and digital waveguides. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, S. 1095–1107.

Berdhahl, Edgar J.; Smith, Julius O., III: Plucked String Digital Waveguide Model. In: REALSIMPLE Project. Online verfügbar unter https://ccrma.stanford.edu/realsimple/.

Bilbao, Stefan (2007): Numerical Sound Synthesis. Hoboken.

Bilbao, Stefan (2009): Numerical sound synthesis. Finite difference schemes and simulation in musical acoustics. Chichester: Wiley.

Bilbao, Stefan; Hamilton, Brian; Torin, Alberto; Webb, Craig; Graham, Paul; Gray, Alan et al.: Large Scale Physical Modelling Synthesis. In: *Conference: Proc. Stockholm Musical Acoustics Conf. (SMAC)* 2013.

Borin, Gianpaolo; De Poli, Giovanni; Sarti, Augusto (1992): Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models. In: *Computer Music Journal* 16 (4), S. 30–42.

Cadoz, Claude; Luciani, A.; Florens, Jean-Loup (1983): Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms. In: *Computer Music Journal* 8 (3).

Castagne, Nicolas; Cadoz, Claude (2002): Creating Music by Means of 'Physical Thinking': The Musician Oriented Genesis Environment. In: *Proc. ofthe 5th Int. Conference on Digital Audio Effects*.

Chaigne, Antoine (1992): On The Use Of Finite Differences For Musical Synthesis. In: *J. Acoust.*, S. 181–211.

Chowning, J.M. (1973): The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 21 (7), S. 526–534.

Erkut, Cumhur; Karjalainen, Matti (2004): Finite difference method vs. digital waveguide method in string instrument modeling and synthesis. In: *Journal on Applied Signal Processing* (7), S. 978–989.

Florens, Jean-Loup; Cadoz, Claude (1991): The Physical Model: Modelling and Simulating the Instrumental Universe. In: *Representations of musical Signals*, S. 227–268.

Hagenow, Henri (2001a): Digitale Synthese komplexer Wellenformen zur Simulation akustischer, elektrischer und optischer Eigenzustände mehrdimensionaler Systeme. Technische Universität Berlin, Berlin. Optisches Institut.

Hagenow, Henri (2001b): Digitale Synthese komplexer Wellenformen zur Simulation akustischer, elektrischer und optischer Eigenzustände mehrdimensionaler Systeme. Technische Universität Berlin, Berlin. Optisches Institut.

Hart, Christoph (2010): Die artefaktfreie Reproduktion spektraler Dynamik bei virtuellen Holzblasinstrumenten. Stuttgart.

Hess, Wolfgang (1993): Digitale Filter. Eine Einführung. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag (Teubner Studienbücher Elektrotechnik). Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-96768-8.

Hiller, L.; Ruiz, P. (1971): Synthesizing musical sounds by solving the wave equation for vibrating objects. In: *Audio Eng. Soc.*, S. 462–470.

IK Multimedia: MODO BASS. Online verfügbar unter https://www.ikmultimedia.com/products/modobass/, zuletzt geprüft am 28.12.2018.

Kaap, Pascal: Sound Design of Modal Synthesis Models. Technische Universität Berlin, Berlin. Institut für Sprache und Kommunikation.

Karjalainen, Matti (2002): 1-D Digital Waveguide Modeling For Improved Sound Synthesis. In: *IEEEE International Conference on Acoustivs, Speech and Signal Processing*.

Karjalainen, Matti (2003): Time-domain physical modelling and real-time synthesis using mixed modelling paradigms. In: *Proceedings of the Stockholm Musical Acoustics Conference*, S. 393–396.

Karjalainen, Matti; Erkut, Cumhur (2004): Digital Waveguides vs. Wave Digital Filters in Physical Modelling: Theoretical and Computationals Asprects. In: *12th European Signal Processing Conference*.

Karplus, Kevin; Strong, Alex (1983): Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres. In: *Computer Music Journal* 7 (2), S. 43–55.

Kontogeorgakopoulos, Alexandros; Cadoz, Claude (2007): Cordis Anima Physical Modeling and Simulation System Analysis. In: *4th Sound and Music Computing Conference 2007*, S. 275–282.

Mantione, Philip: The Fundamentals of Sampling Instruments and Libraries. Pro Audio Files. Online verfügbar unter https://theproaudiofiles.com/fundamentals-sampling-and-instruments-libraries/, zuletzt geprüft am 27.12.2018.

Modartt: Pianoteq. Online verfügbar unter https://www.pianoteq.com/, zuletzt geprüft am 13.12.2018.

Moorer, J. A. (1985): Signal processing aspects of computer music: a survey. In: *Digital Audio Signal Processing*, S. 149–220.

Morse, Philip M. (1948): Vibration and Sound. York: McGraw-Hill Book Company.

Mullan, Eoin: Physical Modelling Sound Synthesis by Digital Waveguide Extraction with Application to Computer Games and Virtual Environments. Queen's University, Belfast. Sonic Arts Research Centre.

Pfeifle, Florian; Bader, Rolf (2012): Real-time Finite Difference Physical Models of Musical Instruments on a Field Programmable Gate Array (FPGA). In: *Proc. ofthe 15th Int. Conference on Digital Audio Effects*.

Rabenstein, Rudolf; Trautmann, Lutz (2001): Digital Sound Synthesis by Physical Modelling. In: *Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*.

Roads, Curtis (1996): The Computer Music Tutorial. Camebridge.

Salo, Maaria: Finite Difference Method in Sound Synthesis.

Serra, Xavier (1997): Musical Sound Modeling with Sinusoids plus Noise. In: *Musical Signal Processing*.

Smith, Julius O., III: Physical Audio Processing. Wave Digital Filters. DSP Related. Online verfügbar unter https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/Wave\_Digital\_Filters\_I.html, zuletzt geprüft am 27.12.2018.

Smith, Julius O., III (1992): Physical Modelling Using Digital Waveguides. In: *Computer Music Journal* 16 (4), S. 74–91. Online verfügbar unter http://www.jstor.org/stable/3680470.

Smith, Julius O., III (1996): Physical Modeling Synthesis Update. In: *Computer Music Journal* 20 (2), S. 44. DOI: 10.2307/3681331.

Smith, Julius O., III (2005): Viewpoints on the History of Digital Synthesis. Stanford.

Smith, Julius O., III (2007): Physical Audio Signal Processing. Stanford. Online verfügbar unter http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/.

Smith, Julius O., III (2008): Digital Waveguide Architectures for Virtual Musical Instruments. In: David Havelock, Sonoko Kuwano und Michael Vorländer (Hg.): Handbook of Signal Processing in Acoustics. New York, NY: Springer New York, S. 399–417.

Smith, Julius O., III (2010): Virtual Acoustic Musical Instruments: Review and Update. In: *Journal of New Music Research* 33 (3), S. 283–304.

Smith, Julius O., III; Berdhahl, Edgar J.: Plucked String Digital Waveguide Model. In: REALSIMPLE Project. Online verfügbar unter https://ccrma.stanford.edu/realsimple/.

Smith, Julius O., III; Berdhahl, Edgar J.: Traveling Waves In A Vibrating String. In: REALSIMPLE Project. Online verfügbar unter https://ccrma.stanford.edu/realsimple/.

Smith, Julius O., III; Jaffe, David A. (1983): Extensions of the Karplus-Strong Plucked-String Algorithm. In: *Computer Music Journal* 7 (2), S. 56–69.

Timon Thalwitzer: Physical Modeling, Wien.

Tolonen, Tero; Välimäki, Vesa; Karjalainen, Matti (1998): Evaluation Of Modern Sound Synthesis Methods. Helsinki.

University of Edinburgh: NESS - Next Generation Sound Synthesis. Online verfügbar unter http://www.ness.music.ed.ac.uk/.

Välimäki, Vesa; Pakarinen, Jyri; Erkut, Cumhur; Karjalainen, Matti (2006): Discrete-time modelling of musical instruments. In: *Rep. Prog. Phys.* 69 (1), S. 1–78.

van den Doel, Kees; Pai, Dinesh K. (2003): Modal Synthesis for Vibrating Objects. In: *Audio Anectodes*.

Vasil, Peter (2013): Graphical Design of Physical Models for Real-Time Sound Synthesis. Technische Universität Berlin, Berlin. Institut für Sprache und Kommunikation.

Webb, Craig J.; Bilbao, Stefan (2015): On the limits of real-time physical modelling synthesis with a modular environment. In: *Proc. ofthe 18th Int. Conference on Digital Audio Effects*.

Wessel, David; Wright, Matthew (2016): 2001: Problems and Prospects for Intimate Musical Control of Computers. New York NY: Springer Berlin Heidelberg.

Wikipedia: Karplus-Strong-Algorithmus. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Karplus-Strong-Algorithmus, zuletzt geprüft am 27.12.2018.