

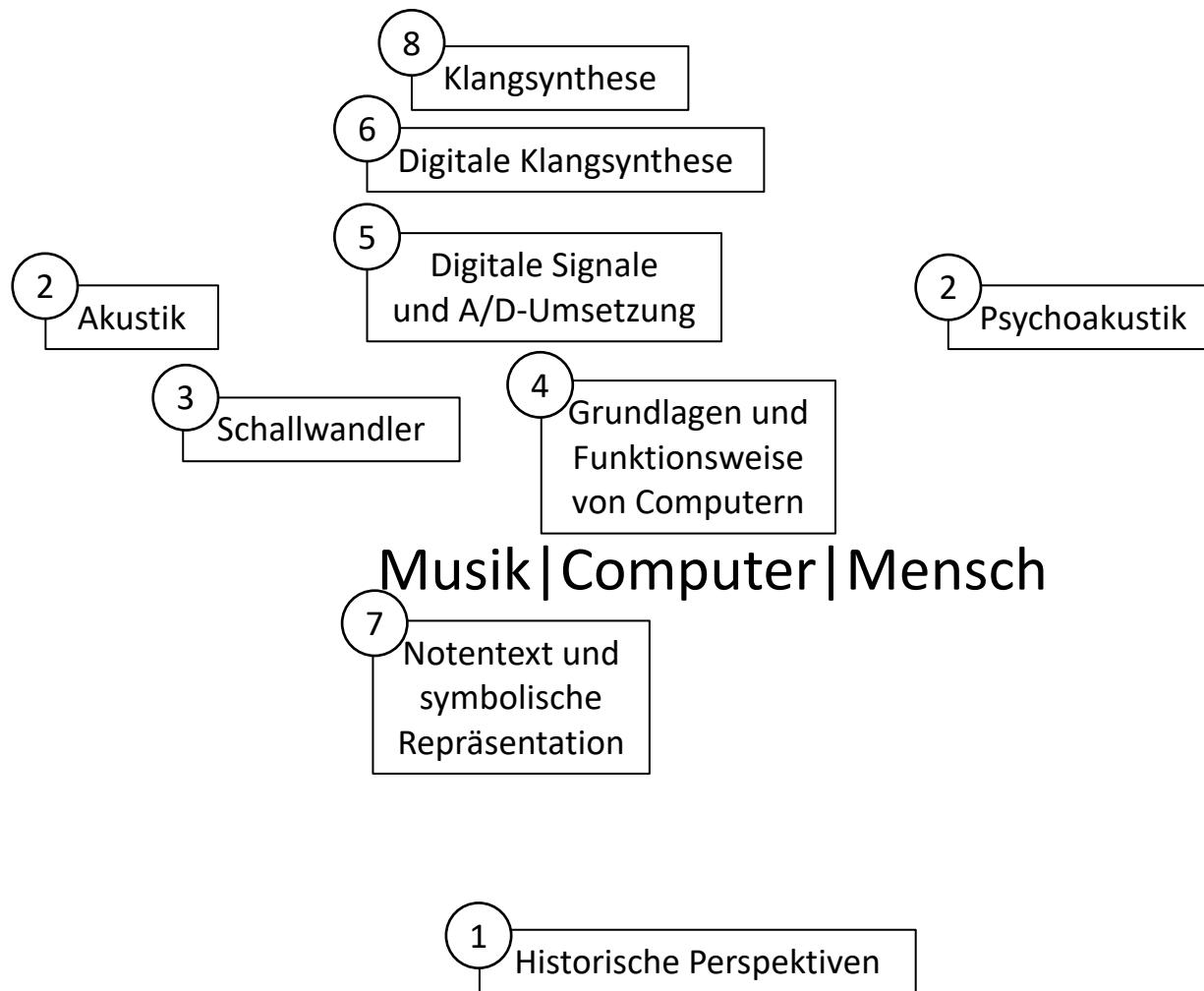
Einführung in die Musikinformatik

Klangsynthese

Prof. Dr. Christoph Seibert

IMWI Institut für Musikinformatik
und Musikwissenschaft





Klangsynthese

- Direkte Synthese (s. WS: „Digitale Klangsynthese“)
- Wavetable-Synthese (s. WS: „Digitale Klangsynthese“)
- Subtraktive Synthese
- Additive Synthese
- Synthese durch Amplituden- und Ringmodulation
- Synthese durch Frequenzmodulation
- Wave-Shaping-Synthese
- Granular-Synthese
- Physical Modelling
- ...

Klangsynthese: Subtraktive Synthese

"Ich schuf eine Vision von David in meinem Kopf und schlug einfach alles weg, was nicht David war."

Michelangelo

Ausgangsmaterial (weisses) Rauschen oder andere Klänge mit reichhaltigem Spektrum

- Umständlich und rechenaufwendig (Filter)
- “natürliche” Klänge durch den “Schmutzanteil”
- als alleinige Lösung meist unzureichend

Klangsynthese: Subtraktive Synthese

Beispiel 1: Montage als Mittel zur „Quasi-Dynamisierung“ der Filterparameter

Henry Pousseur (1929-2009, belgischer Komponist und Musiktheoretiker)
Scambi (1957)

Verschiedene Fassungen des Stücks können durch Montage von 32 Segmente („layer“) erstellt werden.

Die Klänge für die einzelnen Segmente wurden mithilfe subtraktiver Synthese mit weißem Rauschen als Ausgangsmaterial erzeugt.

Regeln bzw. Vorschläge Pousseur's für die Montage:

- Möglichst unmerkliche Übergänge (zwischen dem Ende eines Abschnitts und dem Beginn des nächsten Abschnitts sollte eine möglichst vollständige Übereinstimmung des Charakters bestehen)
- nach und nach Dominanz unterschiedlicher Charaktere

Hörbeispiel:

<https://henripousseur.net/music.php#>



Abb. Herry Pousseur mit Bruno Maderna, 1958
(Quelle: <https://henripousseur.net/photos.php?id=11>)

Klangsynthese: Subtraktive Synthese

Beispiel 2: Dynamisierung der Mittenfrequenz.

Siegfried Koepf

INFLECTOR I (2005)

INFLECTOR ist ein Automat, realisiert in der Open-Source Audio-Programmiersprache PureData, der je nach Audio-Input und in Abhängigkeit von einigen weiteren Parametern unterschiedliche Stücke generiert. Im Prinzip kommt jedes beliebige Audiosignal als Input in Frage. Für diese Aufführung habe ich jedoch entschieden, ein anderes im selben Konzert gespieltes Stück als Inputmaterial zu verarbeiten.

Im Inneren der Maschine arbeiten 24 parallel angeordnete Filter daran, das Audio-Signal zu verbiegen, Bestandteile zu verstärken bzw. zu eliminieren, wobei gleichzeitig ein übergeordneter Prozess die Eigenschaften dieser Filter kontinuierlich umformt. Dies geschieht u.a. auf der Basis einer Tabelle von Frequenzen die in diesem Fall spiegelsymmetrische harmonische Strukturen repräsentieren, wobei die Stimmung des Filtersatzes pausenlos von einer Struktur in eine andere überführt wird. Es entsteht ein mikrotonaler Prozess, getriggert vom Eingangssignal und geformt von der jeweils vorkomponierten bzw. live geregelten internen Disposition des Programms.

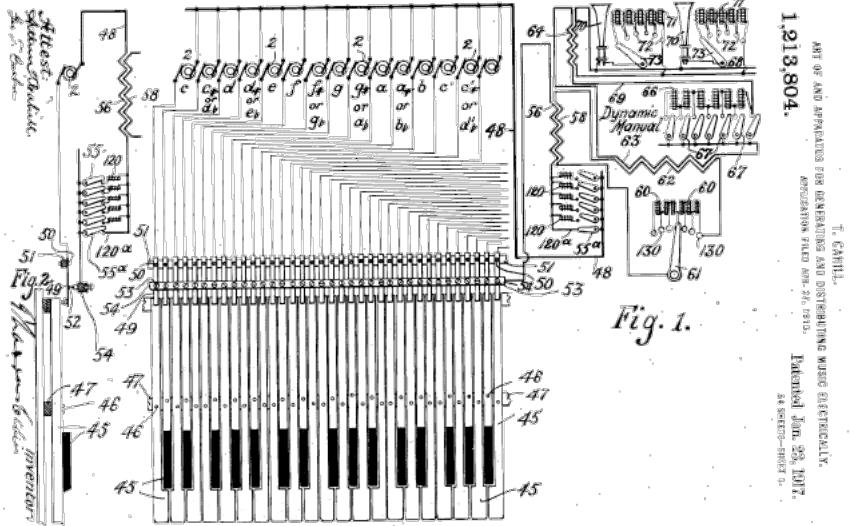


Klangsynthese: Additive Synthesis

Vorbedingung:

Jede komplexe periodische Schwingung lässt als einer Überlagerung von gewichteten sinusförmigen Schwingungen beschreiben. (Joseph Fourier, 1768-1830)

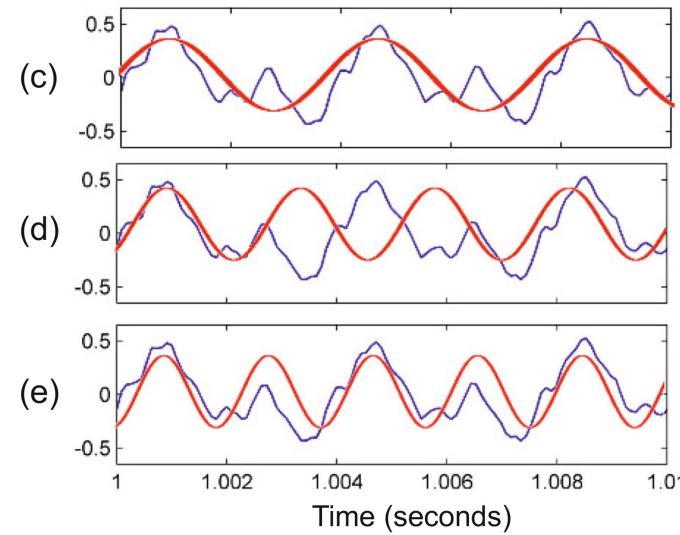
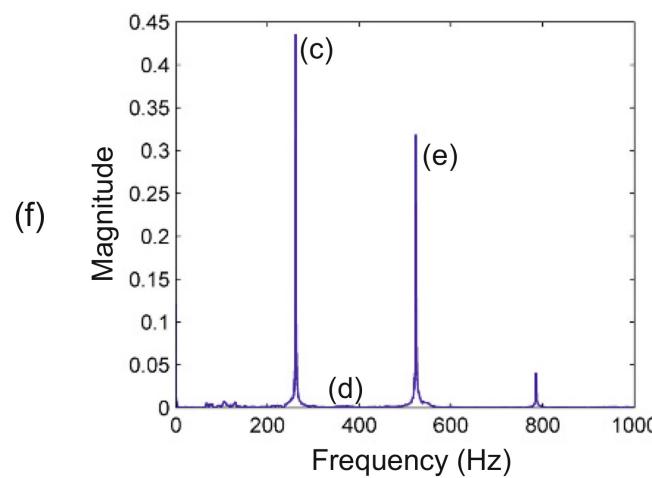
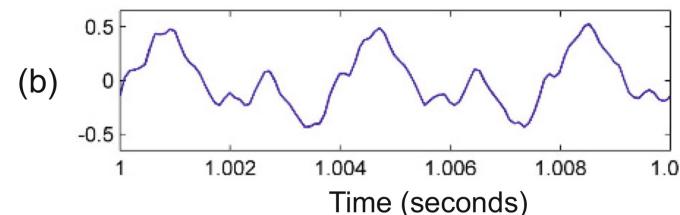
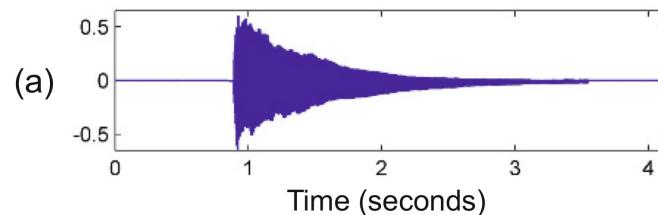
Vgl. Thaddeus Cahill, *Telharmonium* (1906)



Klangsynthese: Additive Synthesis

Vorbedingung:

Jede komplexe periodische Schwingung lässt sich als einer Überlagerung von gewichteten sinusförmigen Schwingungen beschreiben. (Joseph Fourier, 1768-1830)



Jia Liu, *Study of Sine Wave*

Klangsynthese: Additive Synthese

Vorbedingung:

Jede komplexe periodische Schwingung lässt sich als eine Überlagerung von gewichteten sinusförmigen Schwingungen beschreiben. (Joseph Fourier, 1768-1830)

Möglichkeit der Klangsynthese:

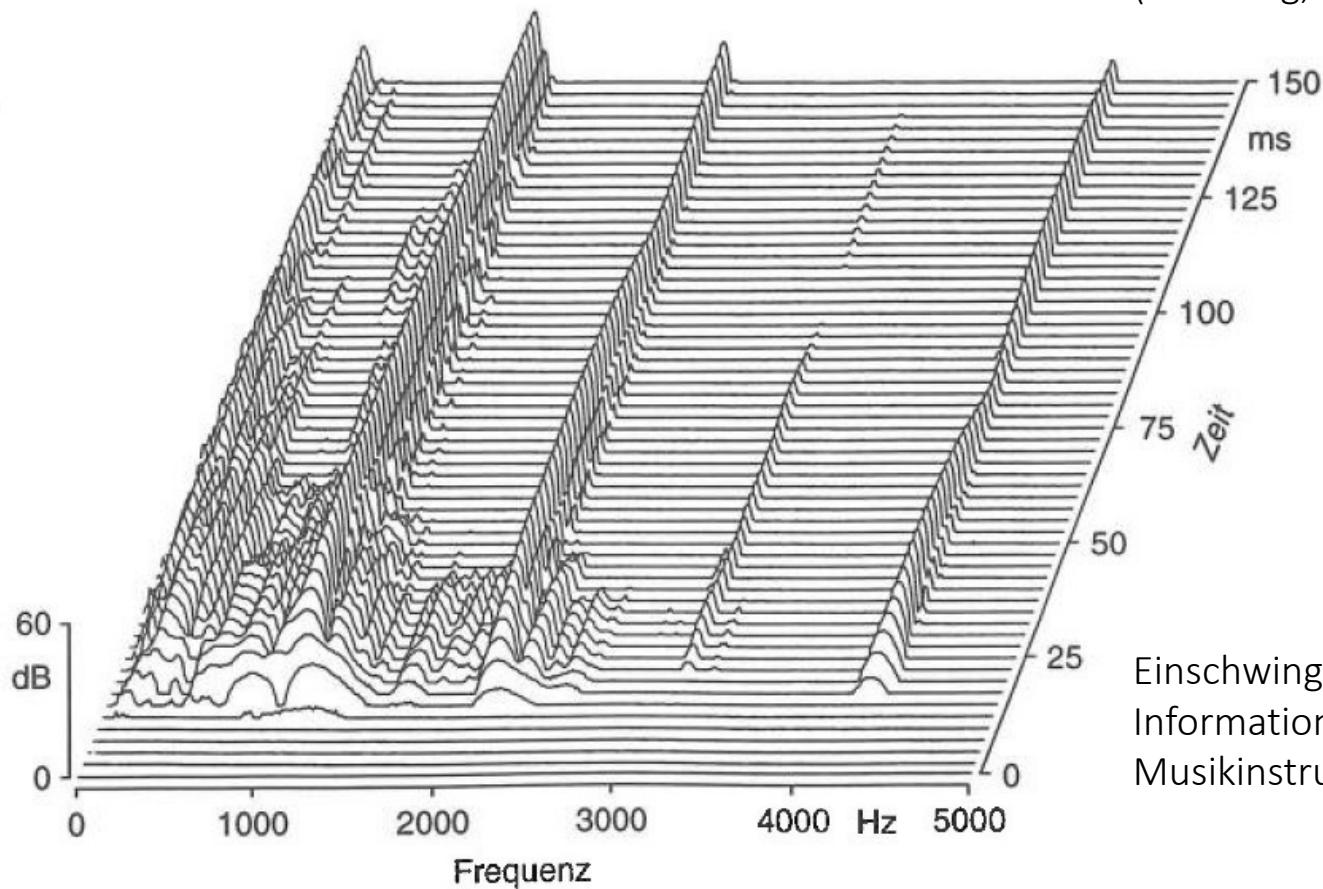
Prinzipiell ist jeder beliebige Klang aus mehreren gewichteten Sinusschwingungen zusammensetzbar.

Einfache Umsetzung:

Additive Synthese mit Partialtönen ohne zeitlichen Verlauf (*fixed-waveform additive synthesis*)

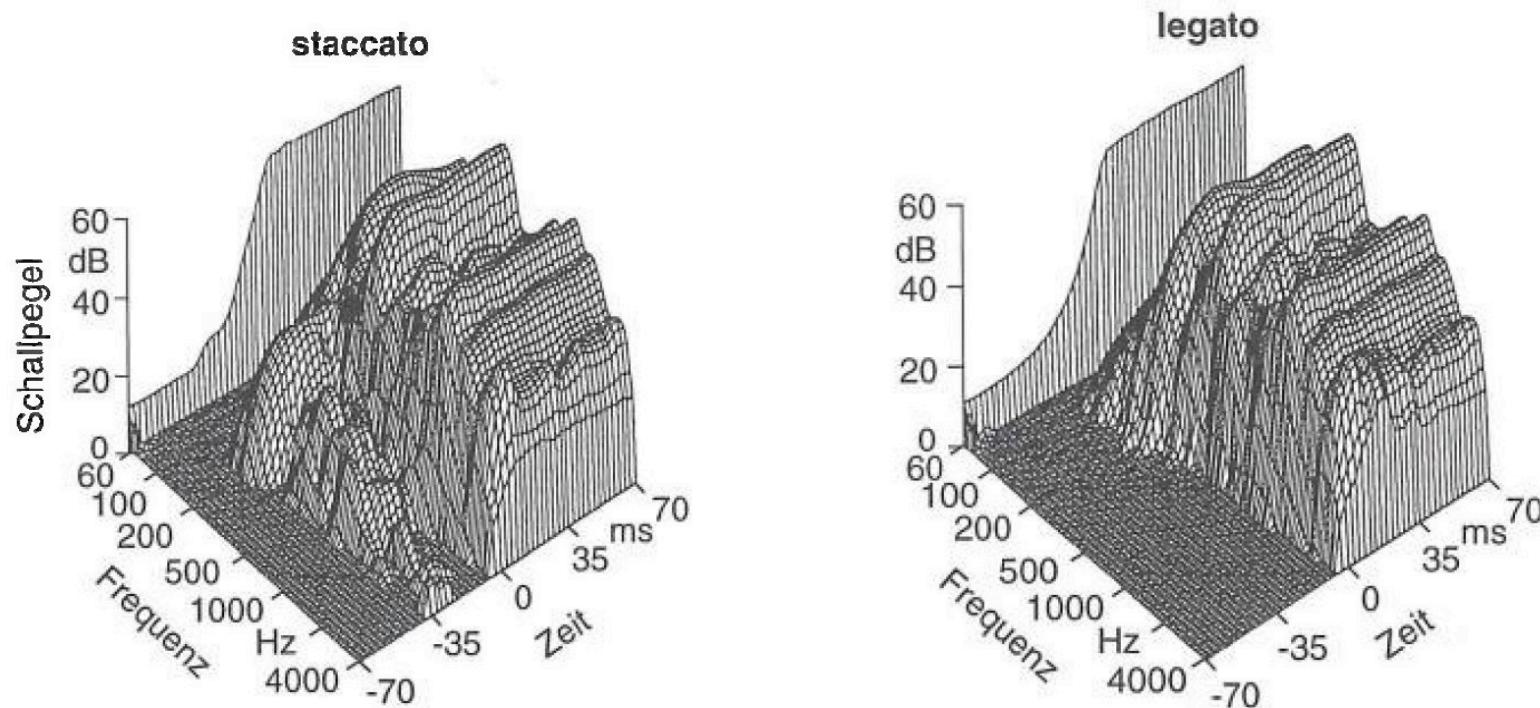
- Lediglich Annäherung des stationären Zustandes eines Klanges
- Realistische Synthese von Instrumentalklängen nicht möglich

Zeitlicher Verlauf eines Klangspektrums
(Messung, Klavierton c)



Einschwingvorgang enthält wichtige
Informationen für das Erkennen von
Musikinstrumenten.

(Abb. Mayer 1999, 27)



Einfluss der Artikulation auf den zeitlichen Verlauf des Frequenzspektrum eines Klaviertones (c)
(links: staccato, rechts: legato)

Klangsynthese: Additive Synthese

Vorbedingung:

Jede komplexe periodische Schwingung lässt sich als eine Überlagerung von gewichteten sinusförmigen Schwingungen beschreiben. (Joseph Fourier, 1768-1830)

Möglichkeit der Klangsynthese:

Prinzipiell ist jeder beliebige Klang aus mehreren gewichteten Sinusschwingungen zusammensetzbar.

Anspruchsvollere Umsetzung:

Additive Synthese mit Partialtönen mit zeitlich veränderlicher Frequenz und Amplitude (*time-varying additive synthesis*)

- Zeitlich veränderliche Zusammensetzung der Partialtöne
- Realistischere Synthese von Instrumentalklängen (einschließlich Vibrato) prinzipiell möglich

Aber:

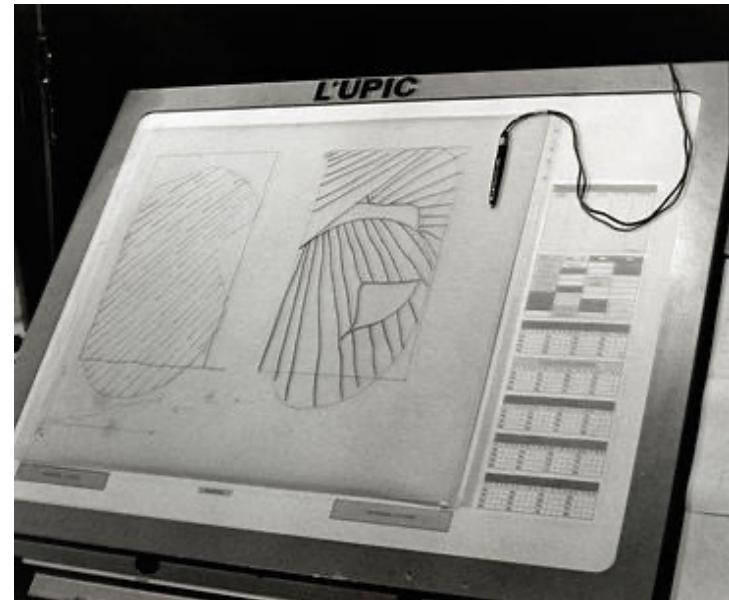
- sehr hoher Berechnungsaufwand, da viele Oszillatoren benötigt werden
- Steuerdaten für die Frequenz und die Amplitude jedes Oszillators müssen spezifiziert werden

Klangsynthese: Additive Synthese

Spezifizierung der Steuerdaten (nach Roads 1996, 143f.):

- Verwendung von Strukturen einer anderen Domäne (z.B. Gebirgsformationen)
vgl. Charles Dodge (1970), *Earth Magnetic Field*
- Verwendung von spezifischen Programmen, in die kompositorische Vorgaben implementiert wurden
- Verwendung von interaktiven Kompositionssystemen, die höherstufige musikalische Konzepte (z.B. Phrasen) in Steuerdaten übersetzen

Bsp.: Iannis Xenakis, UPIC System (



„One should not use the computer only for sound synthesis, but also for macro-structures, building on a large scale [...] The obstacle stood on the side of IT: how to teach notation and concepts that musicians are taught in conservatories to the machine? The solution was the hand: that the musician give orders to the computer through drawings, not punched cards or programs.“

Xenakis, Iannis. Si Dieu existait il serait bricoleur, Le Monde de la musique. n°11, 05/1979, p. 9

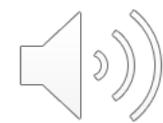
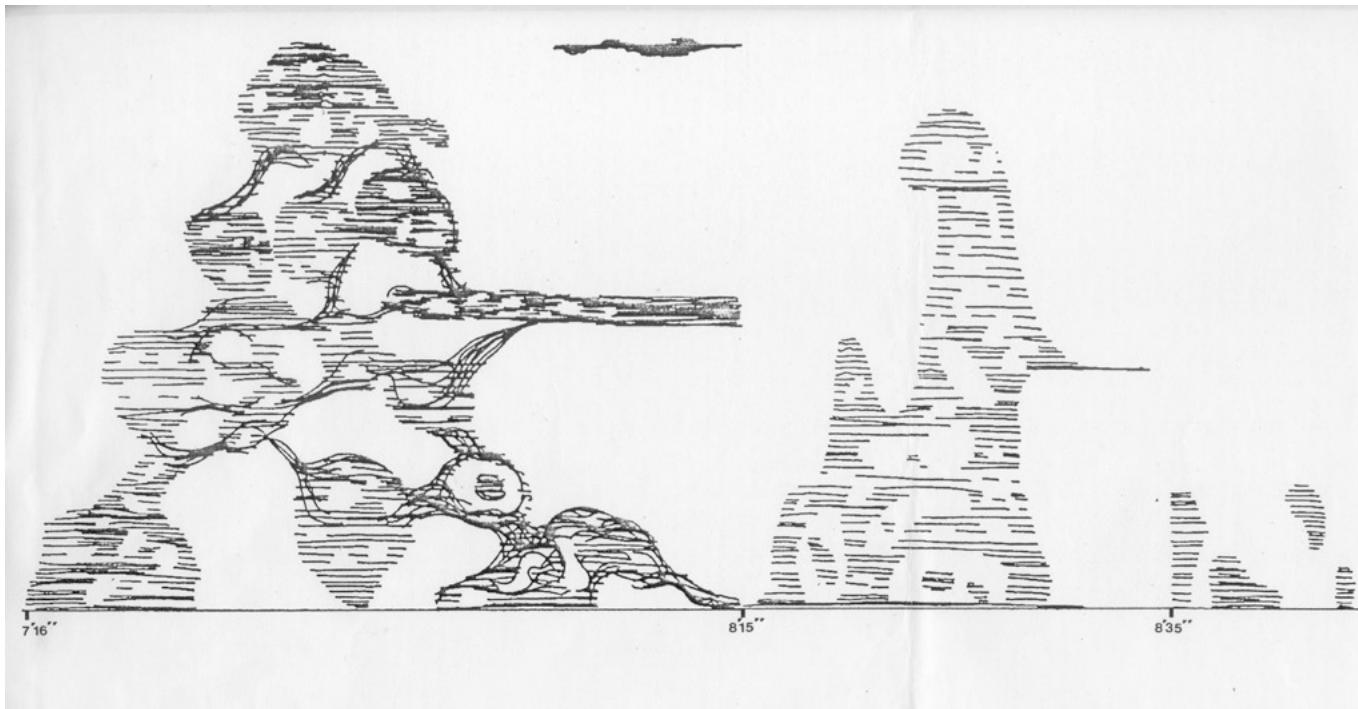


Abb. Iannis Xenakis, Ausschnitt *Mycenae Alpha* (graphische Eingabe für das UPIC-System).

Klangsynthese: Additive Synthese

Spezifizierung der Steuerdaten (nach Roads 1996, 143f.):

- Verwendung von Strukturen einer anderen Domäne (z.B. Gebirgsformationen)
vgl. Charles Dodge (1970), *Earth Magnetic Field*
- Verwendung von spezifischen Programmen, in die kompositorische Vorgaben implementiert wurden
- Verwendung von interaktiven Kompositionssystemen, die höherstufige musikalische Konzepte (z.B. Phrasen) in Steuerdaten übersetzen
- Manuelle Eingabe auf der Grundlage von Intuition, theoretischem oder empirischen psychoakustischem Wissen
- Ausgehend von Analysen von (natürlichen) Klängen, die die Werte der Kontrollparameter spezifizieren, die für eine Re-Synthese ebendieser Klänge erforderlich sind, vgl. Trevor Wishart (1988), *Vox-5* (→ Analyse/Resynthese)

Klangsynthese: Additive Synthese

Analyse/Resynthese

Resynthese: Zusammensetzung neuer Klänge aus zuvor analysierten und/oder differenzierten Klangelementen mit gewünschten Eigenschaften.

Arten der Resynthese (nach Ruschkowski 2010, 335)

- Resynthese auf der zeitlichen Ebene (z.B. Granularsynthese, aber auch Tonbandschnitt)
- Resynthese auf der spektralen Ebene (Zusammensetzung der Partialtöne)

Klangsynthese: Additive Synthesis

Analyse/Resynthesen

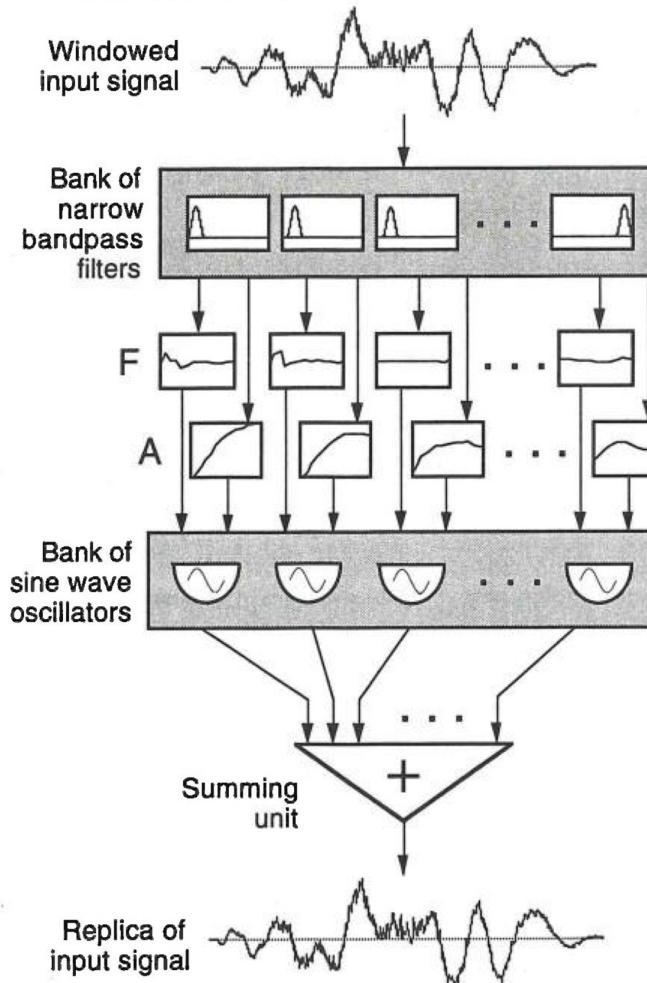
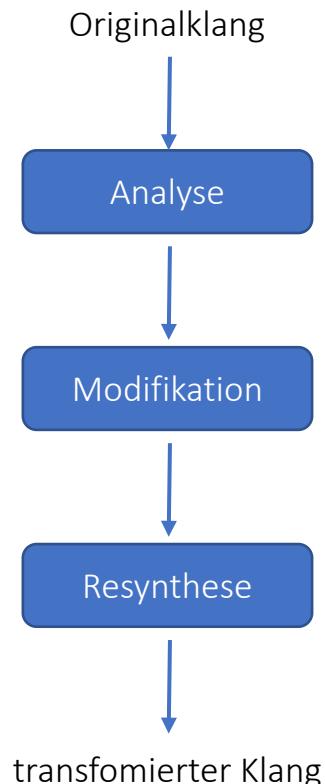


Abb. Roads 1996, 145.

Klangsynthese: Additive Synthese

Analyse/Resynthese – musikalische Anwendungen

Grundsätzlich: zeit- und frequenzbezogene Aspekte können unabhängig voneinander manipuliert werden

Effekt	Technik
Spektrum skalieren	Multiplikation der Frequenzen aller Partialtöne mit einem Faktor
Spektrum verschieben	Addition eines Wertes zu der Frequenz aller Oszillatoren
Klangfarben-Hybride erzeugen	Mischung der Kontrolldaten, die auf der Analyse verschiedener Klänge basieren
Zeitliche Dehnung ohne Tonhöhenveränderung	Dehnung der Hüllkurven für Frequenz und Amplitude
Interpolation zwischen Klangfarben	Interpolation zwischen den Frequenz- und Amplituden-Hüllkurven verschiedener Klänge
<i>Cross-synthesis</i>	Verwendung der Amplituden-Hüllkurven eines Klangs um die Amplituden-Hüllkurven (oder Frequenz-Hüllkurven) eines anderen Klangs zu steuern.

Klangsynthese: Additive Synthese im Verhältnis zu anderen Syntheseverfahren

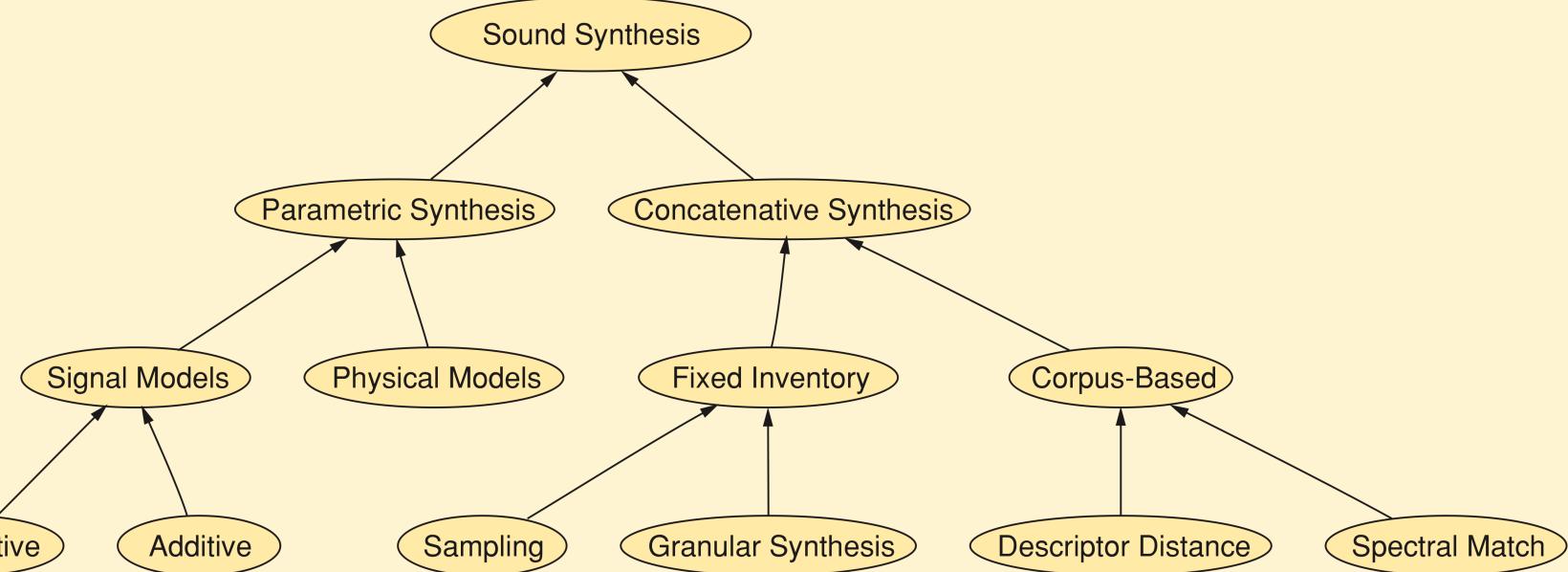


Abb.: Schwarz 2007, 94.

Klangsynthese: Additive Synthese im Verhältnis zu anderen Syntheseverfahren

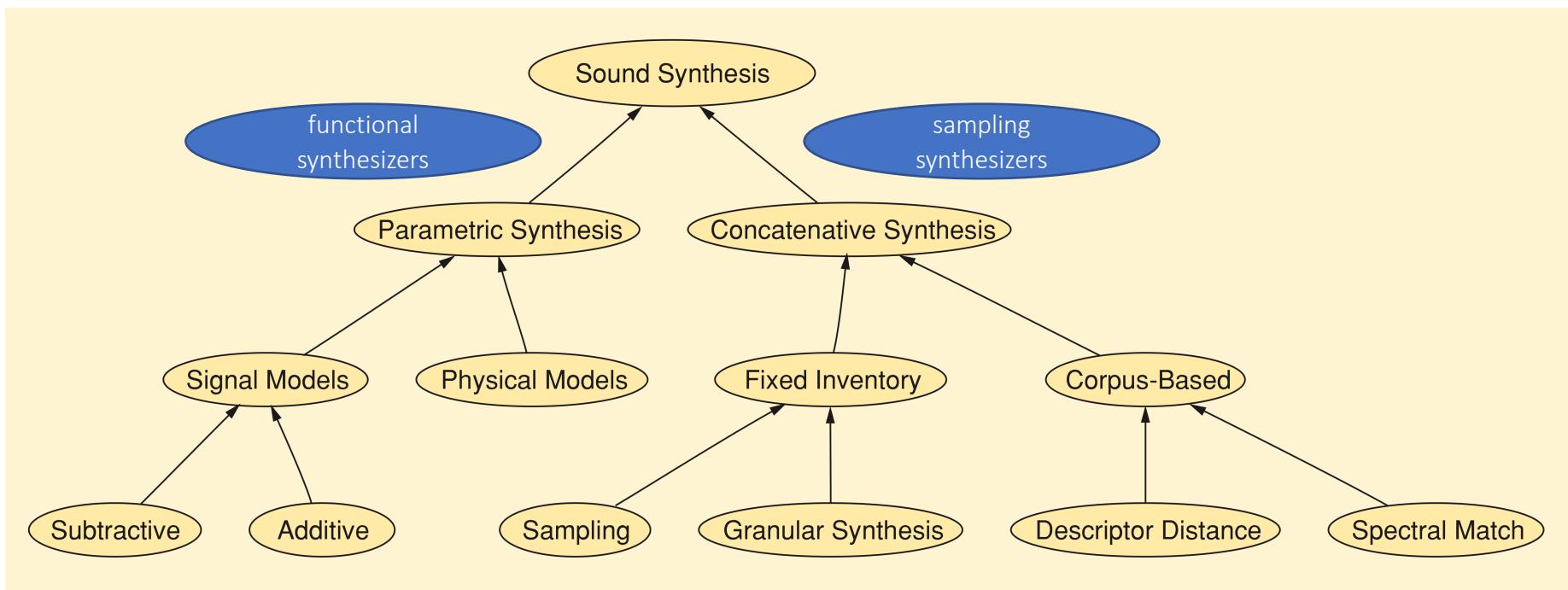


Abb.: Schwarz 2007, 94, ergänzt nach Lindemann 2007, 80f.

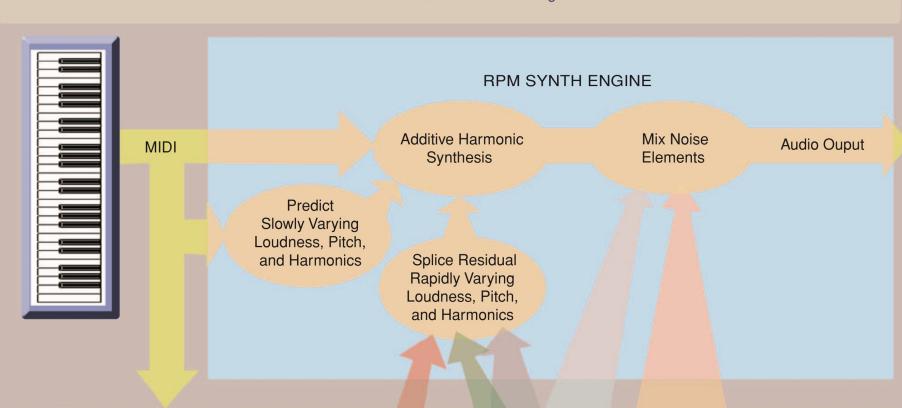
Klangsynthese: Additive Synthese mit *reconstructive phrase modelling*
(Lindemann 2007)

Kombination aus
functional synthesizer und *sampling synthesizer*

additiver Synthese (zeitlich veränderlichen Partialtöne und Rauschen) und
konkatenativer Synthese



Klangbeispiel: Ausschnitt aus L. v. Beethoven: Streichquartett Op. 132.
(Abrufbar unter: <http://www.synful.com>)



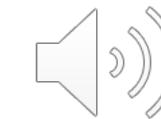
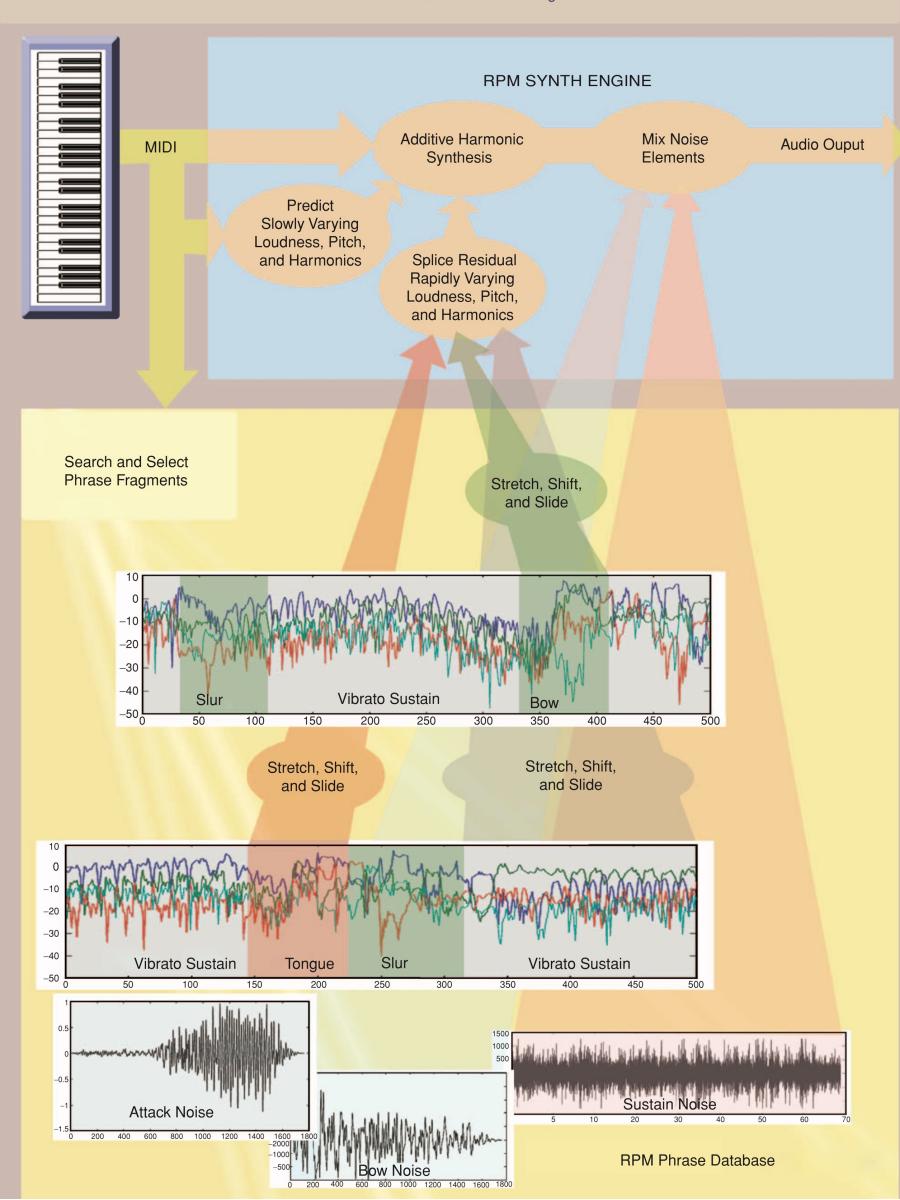


Abb. Schematische Darstellung eines Synthesizers mit Reconstructive Phrase Modelling (Lindeman 2007, 83).

Klangsynthese: Synthese durch Modulation

Modulation: Ein Signal (das Trägersignal) wird durch ein zweites Signal (das Modulationssignal) beeinflusst.

Modulationseffekte, die auch bei natürlichen Instrumenten vorkommen:

- Tremolo: langsame Änderung der Amplitude des Trägersignals
- Vibrato: langsame Änderung der Frequenz des Trägersignals

Eine „langsame Änderungsrate“ entspricht einer Modulationsfrequenz von etwa $< 16 \dots 20 \text{ Hz}$, d.h. unterhalb des Hörbereichs.

Klangsynthese: Amplitudenmodulation (Ringmodulation)

Änderung der Amplitude des Trägersignals (Tremolo bei Modulationsfrequenz $f_M < 16 \dots 20 \text{ Hz}$).

→ Multiplikation des Trägersignals mit einem zeitlich veränderlichen Faktor, d.h. einem zweiten sinusförmigen Signal

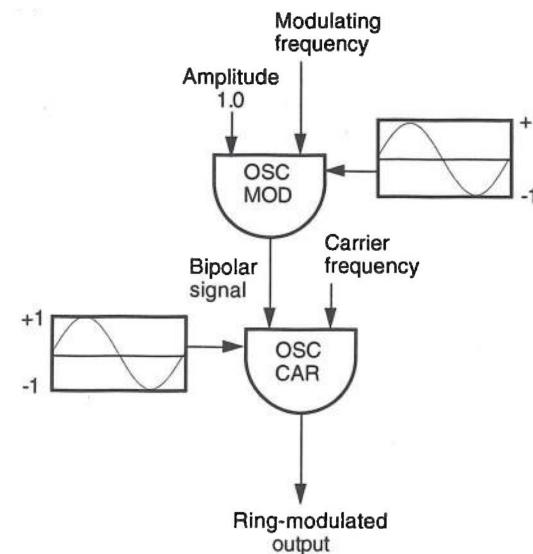
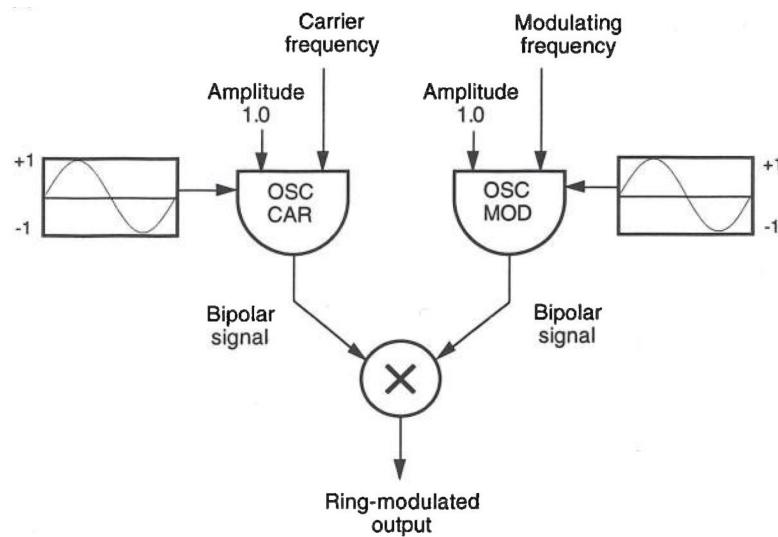


Abb. Roads 1996, 218

Klangsynthese: Amplitudenmodulation (Ringmodulation)

Änderung der Amplitude des Trägersignals (Tremolo bei Modulationsfrequenz $f_M < 16 \dots 20 \text{ Hz}$).

→ Multiplikation des Trägersignals mit einem zeitlich veränderlichen Faktor, d.h. einem zweiten sinusförmigen Signal

Wenn die Modulationsfrequenz f_M im Hörbereich liegt, entstehen zusätzliche Frequenzen:

- oberes Seitenband: Addition der Frequenzen im Trägersignal und der Frequenzen im Modulationssignal
- Unteres Seitenband: Subtraktion der Frequenzen im Trägersignal und der Frequenzen im Modulationssignal

$$\cos(C) \times \cos(M) = 0.5 \times [\cos(C - M) + \cos(C + M)]$$

Beispiel 1:

Trägerfrequenz $f_C = 1000 \text{ Hz}$

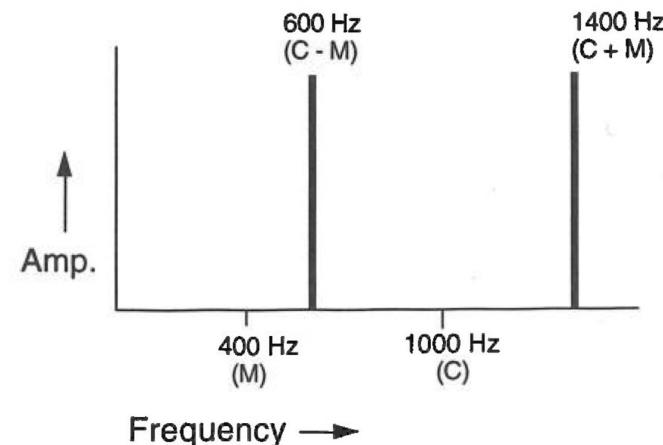
Modulationsfrequenz $f_M = 400 \text{ Hz}$

Moduliertes Signal enthält die Frequenzen

$$f_{C+M} = 1400 \text{ Hz}$$

$$f_{C-M} = 600 \text{ Hz}$$

Abb. Resultierendes Spektrum (Roads 1996, 219)



Beachte: Die Trägerfrequenz ist nicht im modulierten Ausgangssignal enthalten.

Klangsynthese: Amplitudenmodulation (Ringmodulation)

Änderung der Amplitude des Trägersignals (Tremolo bei Modulationsfrequenz $f_M < 16 \dots 20 \text{ Hz}$).

→ Multiplikation des Trägersignals mit einem zeitlich veränderlichen Faktor, d.h. einem zweiten sinusförmigen Signal

Wenn die Modulationsfrequenz f_M im Hörbereich liegt, entstehen zusätzliche Frequenzen:

- oberes Seitenband: Addition der Frequenzen im Trägersignal und der Frequenzen im Modulationssignal
- Unteres Seitenband: Subtraktion der Frequenzen im Trägersignal und der Frequenzen im Modulationssignal

$$\cos(C) \times \cos(M) = 0.5 \times [\cos(C - M) + \cos(C + M)]$$

Beispiel 2:

Trägerfrequenz $f_C = 100 \text{ Hz}$

Modulationsfrequenz $f_M = 400 \text{ Hz}$

Moduliertes Signal enthält die Frequenzen

$$f_{C+M} = 500 \text{ Hz}$$

$$f_{C-M} = -300 \text{ Hz}$$

(dies entspricht einem Signal mit der Frequenz
 $f = 300 \text{ Hz}$ bei invertierter Phase)

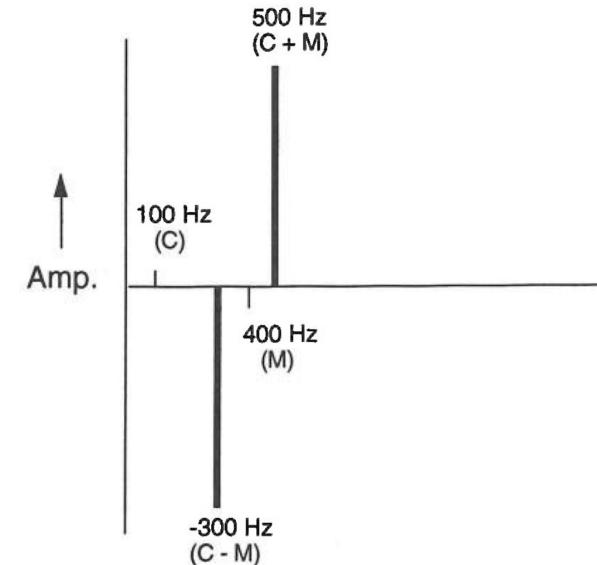


Abb. Resultierendes Spektrum (Roads 1996, 219)

Klangsynthese: Amplitudenmodulation (Ringmodulation)

Analoge Schaltungen weisen in Abhängigkeit der eingesetzten Bauteile (Dioden) klangliche Unterschiede auf. Entspricht das Modulationssignal quasi einer Rechteckschwingung, enthält das modulierte Signal noch höhere Frequenzanteile (→ historisch informierte Aufführungspraxis von Musik mit Live-Elektronik).

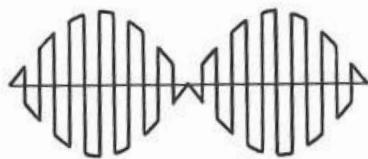
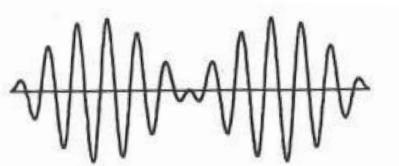


Abb. oben: Ringmodulation durch Signalmultiplikation; unten: Ringmodulation mittels clipping einer Diodenschaltung (Roads 1996, 221).



Klangbeispiel 1: Luigi Nono, Con Luigi Dallapiccola, T. 17 ff. (Modulationsfrequenzen: 8 Hz, 10 Hz, 12 Hz)

Klangsynthese: Amplitudenmodulation (Ringmodulation)

Analoge Schaltungen weisen in Abhängigkeit der eingesetzten Bauteile (Dioden) klangliche Unterschiede auf. Entspricht das Modulationssignal quasi einer Rechteckschwingung, enthält das modulierte Signal noch höhere Frequenzanteile (→ historisch informierte Aufführungspraxis von Musik mit Live-Elektronik).

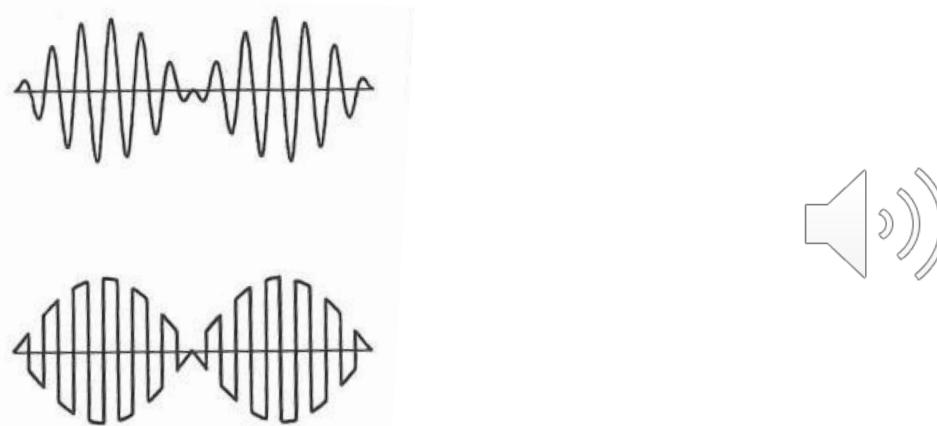


Abb. oben: Ringmodulation durch Signalmultiplikation; unten: Ringmodulation mittels clipping einer Diodenschaltung (Roads 1996, 221).

Klangbeispiel 2: Luigi Nono, Con Luigi Dallapiccola, T. 61 ff. (Modulationsfrequenzen: 6000 Hz, 7000 Hz, 8000 Hz)

Klangsynthese: Amplitudenmodulation

Ringmodulation (Spezialfall der Amplitudenmodulation):

Multiplikation zweier bipolarer Signale (Wertebereich $-1 \dots 1$)

Amplitudenmodulation:

Multiplikation eines bipolaren Signals mit einem unipolaren Signal (Wertebereich $0 \dots 1$)

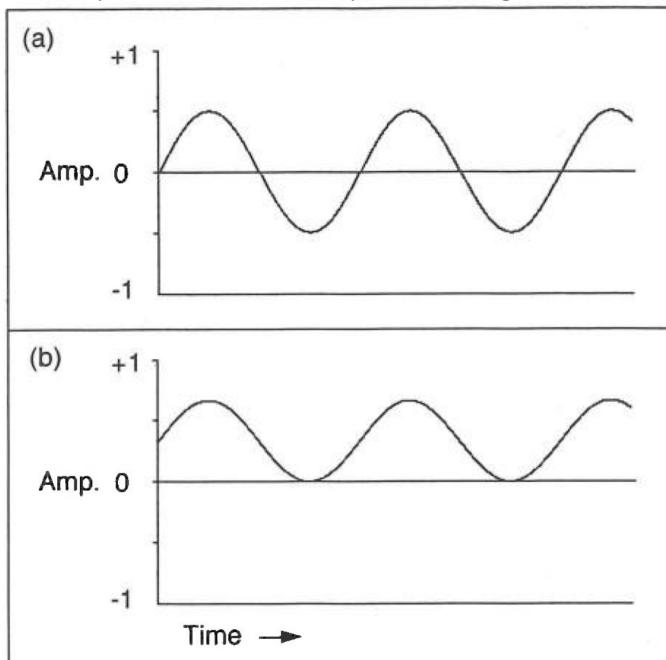


Abb. Bipolares (a) und unipolares (b) Signal (Roads 1996, 216).

Klangsynthese: Amplitudenmodulation

Ringmodulation (Spezialfall der Amplitudenmodulation):

Multiplikation zweier bipolarer Signale (Wertebereich $-1 \dots 1$)

Amplitudenmodulation:

Multiplikation eines bipolaren Signals mit einem unipolaren Signal (Wertebereich $0 \dots 1$)

Das modulierte Signal enthält ein oberes und ein unteres Seitenband, sowie das Trägersignal.

$$AmpMod = f_{c-M} + f_c + f_{c+M}$$

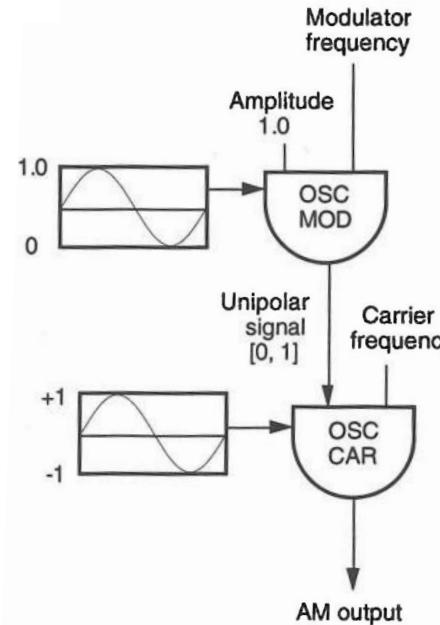
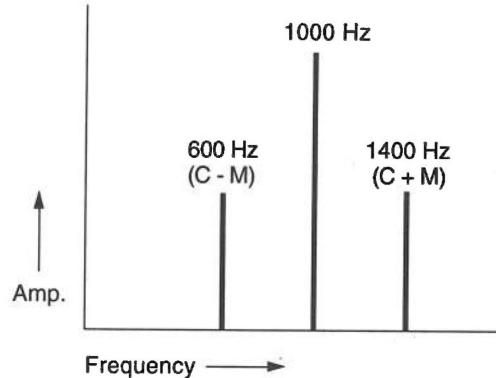


Abb. Roads 1996, 222 (links) und 224 (rechts).

Klangsynthese: Amplitudenmodulation

Komplexere Implementierung mit zeitlich veränderlichem Modulationsindex

$$AmpMod = A_C \times \cos(C) + \frac{I \times A_C}{2} \times \cos(C + M) + \frac{I \times A_C}{2} \times \cos(C - M)$$

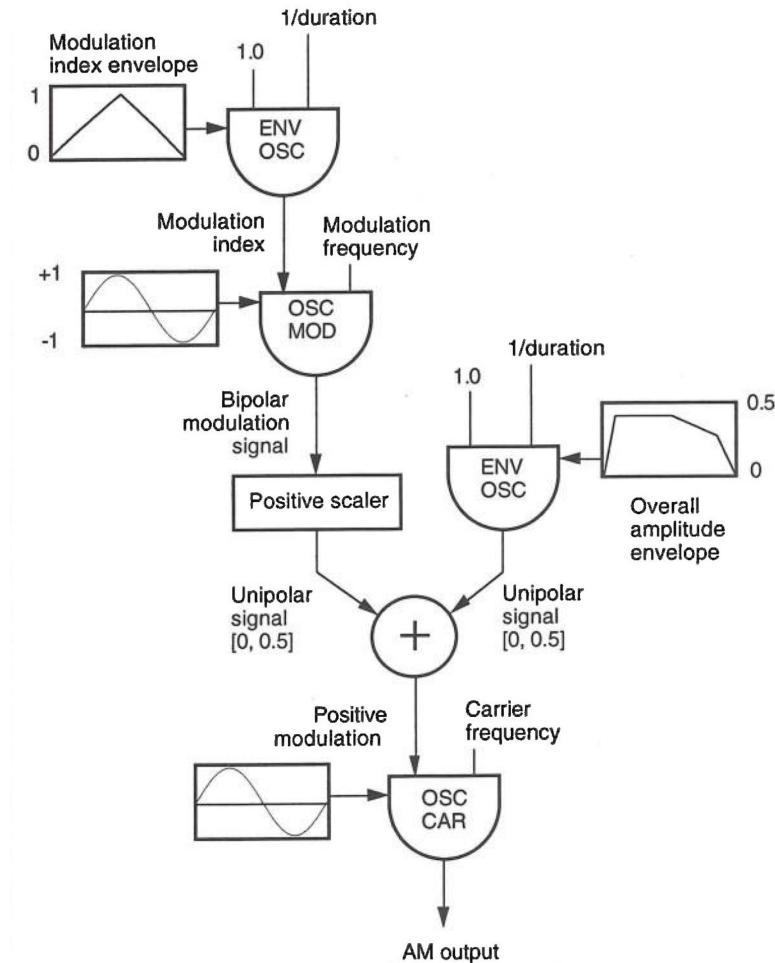


Abb. Implementierung eines AM-Synthesizers mit Steuerung des Modulationsindex und der Amplitude über den Zeitraum eines Ereignisses (Roads 1996, 225)

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Änderung der Frequenz des Trägersignals (Vibrato bei Modulationsfrequenz $f_M < 16 \dots 20 \text{ Hz}$).
 → Addition eines zeitlich veränderlichen sinusförmigen Signals zum Trägersignal

$$\text{FreqMod}_t = A \times \sin(C_t + [I \times \sin(M_t)])$$

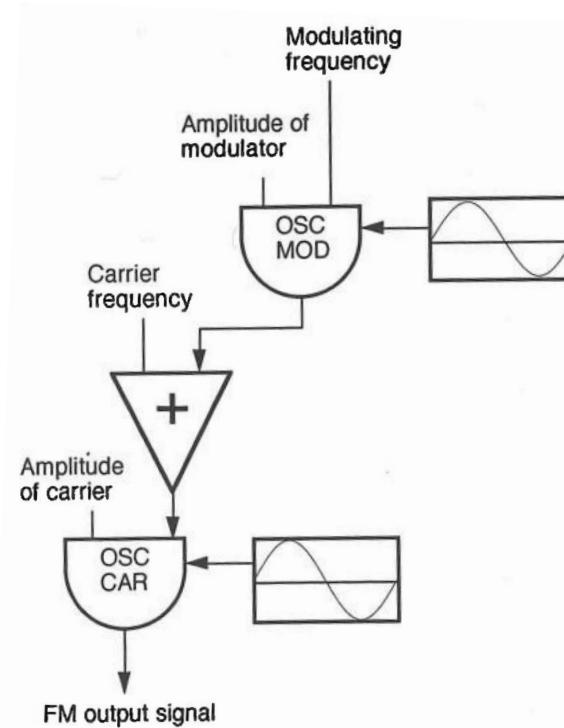


Abb. Einfache Implementierung eines FM Synthesizers
 (Roads 1996, 227).

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Änderung der Frequenz des Trägersignals (Vibrato bei Modulationsfrequenz $f_M < 16 \dots 20 \text{ Hz}$).

→ Addition eines zeitlich veränderlichen sinusförmigen Signals zum Trägersignal

$$FreqMod_t = A \times \sin(C_t + [I \times \sin(M_t)])$$

Wenn die Modulationsfrequenz f_M im Hörbereich liegt, entstehen zusätzliche Frequenzen, z.B.:

$$FreqMod = f_c + f_{c+M} + f_{c+2M} + f_{c+3M} + f_{c-M} + f_{c-2M} + f_{c-3M}$$

Nur bei einem ganzzahligen Verhältnis der Frequenzen des Trägersignals und des Modulationssignals, entstehen harmonische Spektren.

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Die Bandbreite des frequenzmodulierten Signals, d.h. die Anzahl der Seitenbänder, wird durch den **Modulationsindex** festgelegt:

$$I = D/f_M$$

I = Modulationsindex

D = Modulationstiefe (Frequenzhub des Modulators, d.h. die durch die Modulation verursachte Änderung der Trägerfrequenz)

f_M =Modulationsfrequenz

Bei größerem Modulationsindex I verteilt sich die Energie des Trägers auf die hinzukommenden Seitenbänder.

Die Anzahl der relevanten Seitenbänder beträgt etwa $I + 1$.

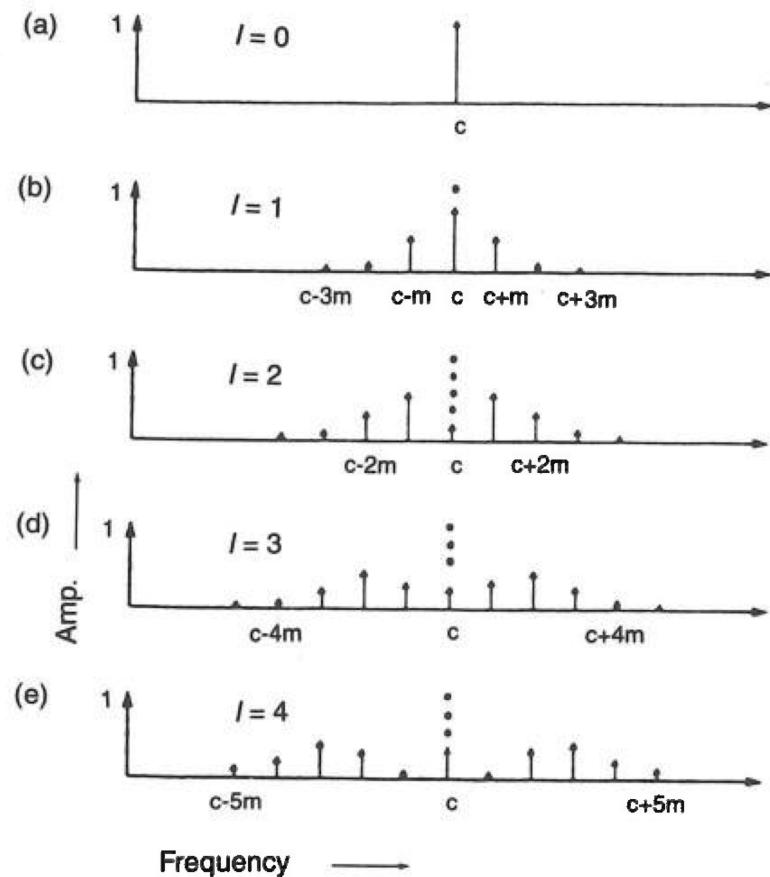


Abb. Seitenbänder bei verschiedenen Modulationsindizes
(Roads 1996, 230)

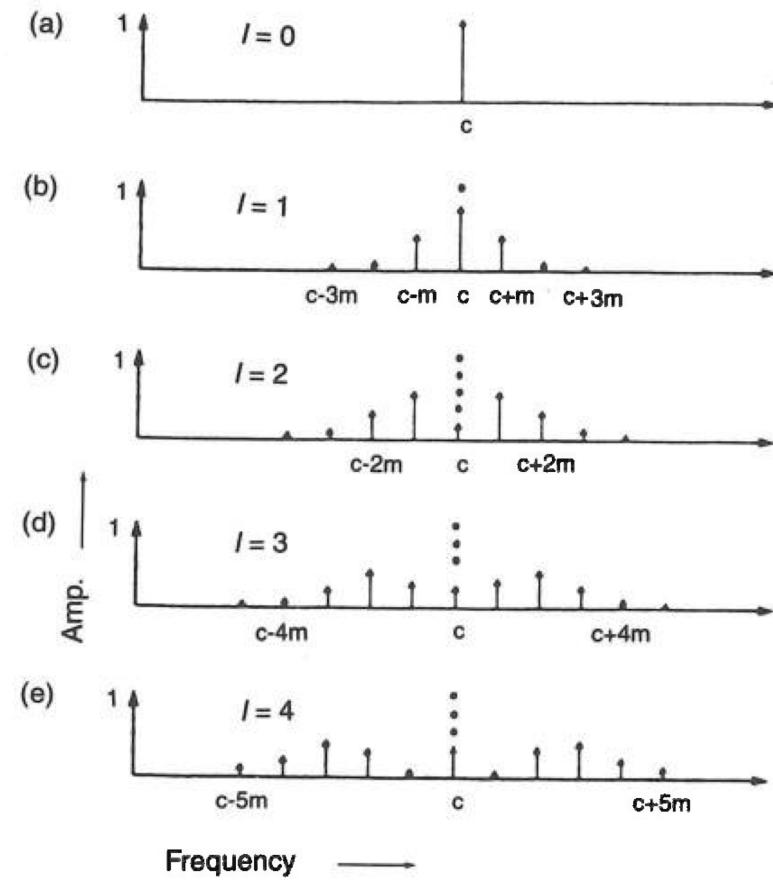
Klangsynthese: Frequenzmodulation

Die Amplitude der einzelnen Partialtöne der Seitenbänder wird durch die Besselfunktionen beschrieben.

Bei steigendem Modulationsindex scheinen einzelnen Partialtöne quasi zufällig hinzutreten und zu verschwinden.

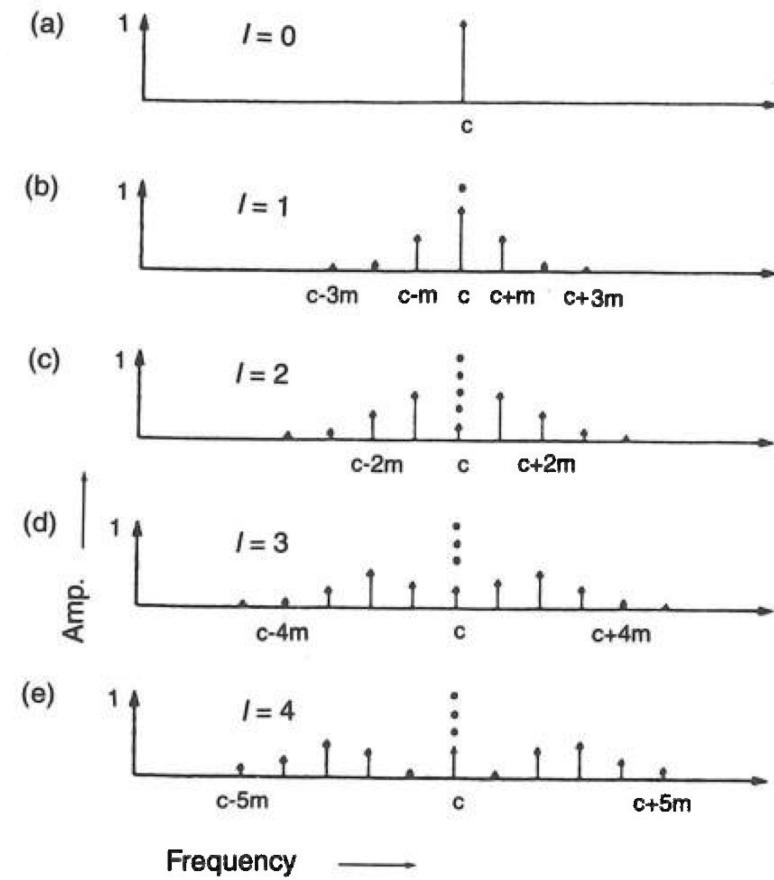
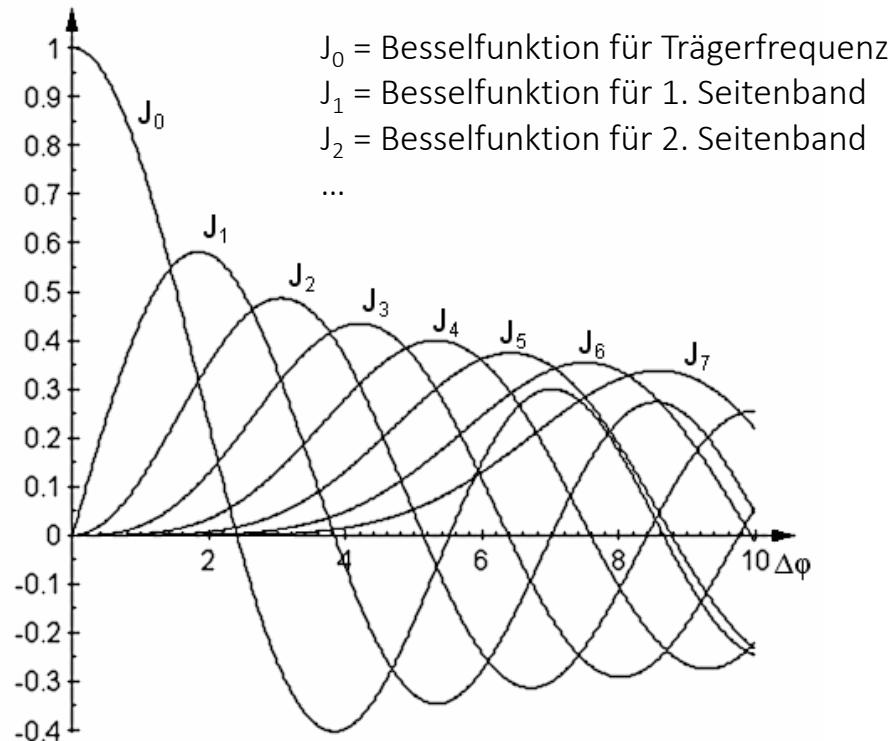


Abb. Seitenbänder bei verschiedenen Modulationsindizes
(Roads 1996, 230)



Klangbeispiel: Frequenzmodulation eines Sinustons mit einem anderen Sinuston bei dynamischem Modulationsindex (YAMAHA DX7)

Klangsynthese: Frequenzmodulation



Klangsynthese: Frequenzmodulation

Die Amplitude der einzelnen Partialtöne der Seitenbänder wird durch die Besselfunktionen beschrieben.
 Bei steigendem Modulationsindex scheinen einzelnen Partialtöne quasi zufällig hinzutreten und zu verschwinden.

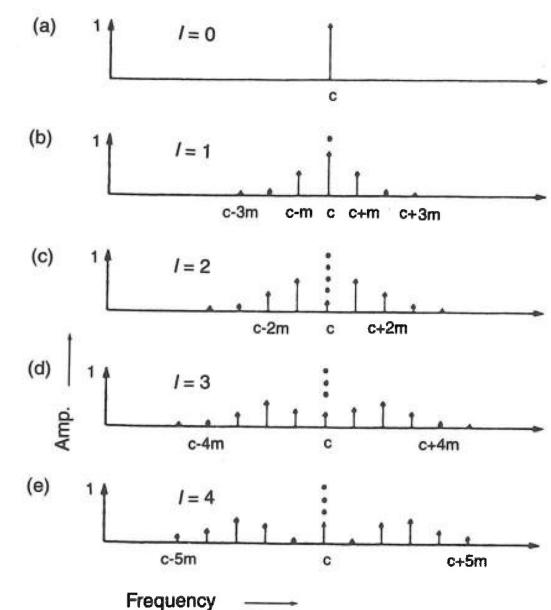
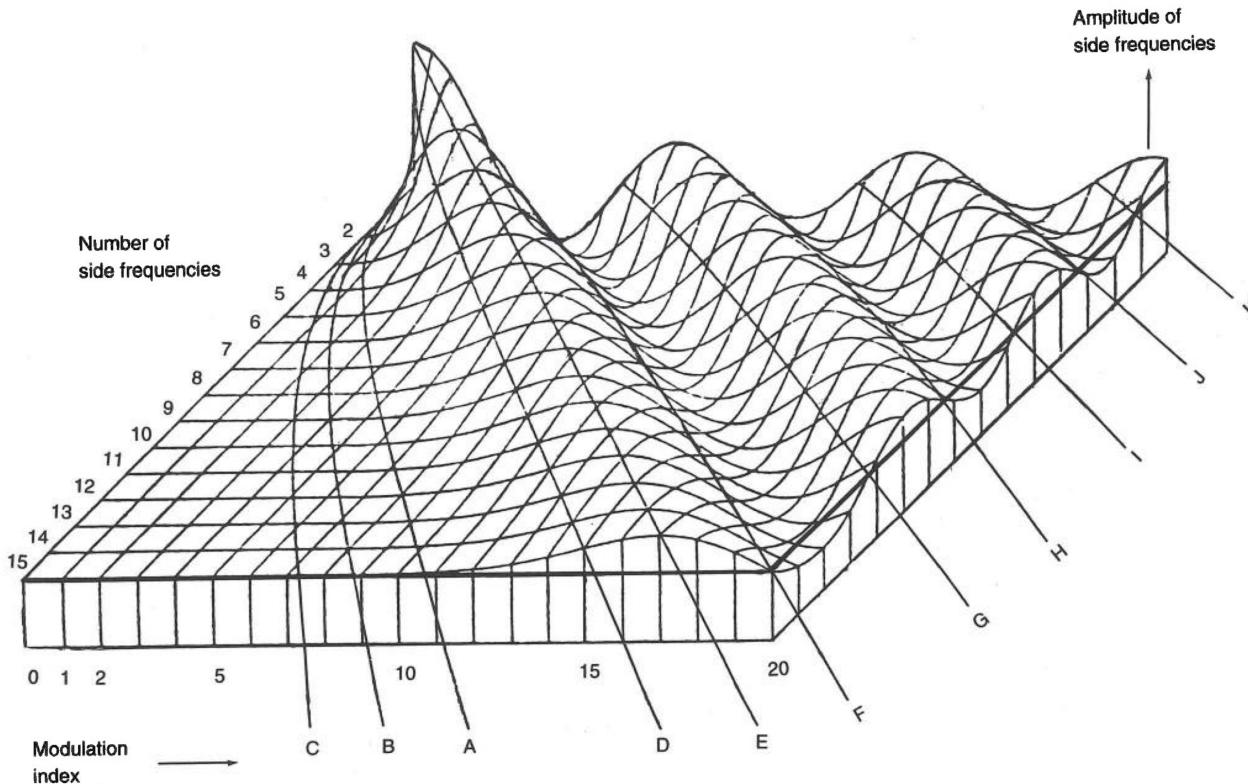


Abb. Dreidimensionaler Graph der Bessel-Funktionen 1-15 als Funktion des Modulationsindex I und resultierende Amplitude der entsprechenden Partialtöne im Seitenband (Roads 1996, 233):

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Die Amplitude der einzelnen Partialtöne der Seitenbänder wird durch die Besselfunktionen beschrieben.
Bei steigendem Modulationsindex scheinen einzelnen Partialtöne quasi zufällig hinzutreten und zu verschwinden.

→ Problem der Parameter Abschätzung:

Wie müssen die FM-Parameter justiert werden, um ein bestimmtes Spektrum zu erzeugen?

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Abwandlungen:

- Frequenzmodulation mit mehreren Trägersignalen

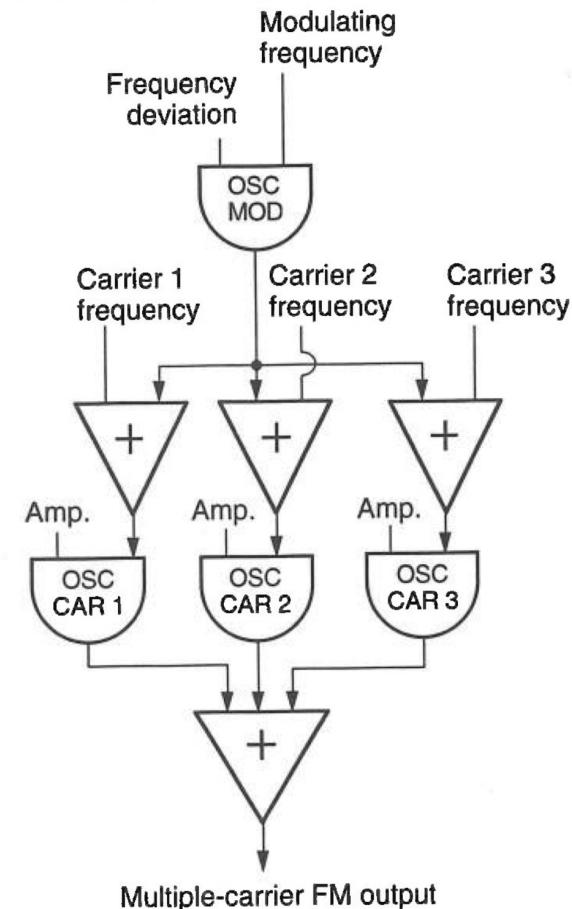


Abb.: FM-Synthesizer mit drei Oszillatoren für das Trägersignal
(Roads 1996, 238).

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Abwandlungen:

- Frequenzmodulation mit mehreren Trägersignalen
- Frequenzmodulation mit mehreren Modulatorsignalen (in Parallel- oder Reihenschaltung)

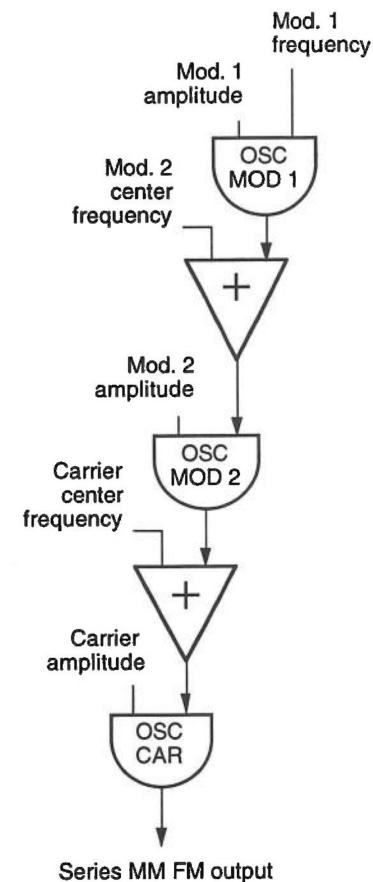
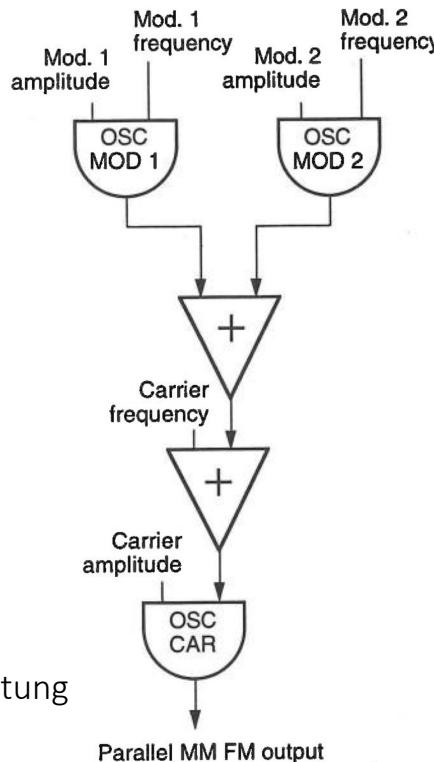


Abb.: FM-Synthesizer mit zwei Modulatoren in Parallelschaltung (links) und Serienschaltung (rechts)
(Roads 1996, 240).

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Abwandlungen:

- Frequenzmodulation mit mehreren Trägersignalen
- Frequenzmodulation mit mehreren Modulatorsignalen (in Parallel- oder Reihenschaltung)
- Frequenzmodulation mit Rückkopplung

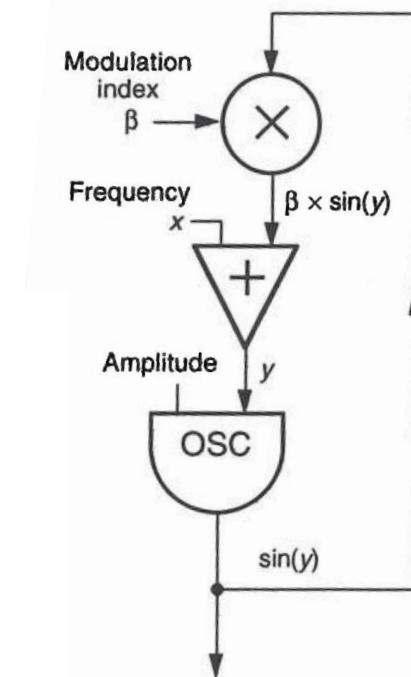


Abb.: FM-Synthesizer mit Feedback (Roads 1996, 245).

Klangsynthese: Frequenzmodulation

Abwandlungen:

- Frequenzmodulation mit mehreren Trägersignalen
- Frequenzmodulation mit mehreren Modulatorsignalen (in Parallel- oder Reihenschaltung)
- Frequenzmodulation mit Rückkopplung

Vorteil:

Komplexe Spektren können mit nur wenigen Oszillatoren erzeugt werden

Nachteile:

- Kein anschaulicher Bezug zwischen der Manipulation relevanter Parameter der Frequenzmodulation und dem klanglichen Ergebnis
- Synthesizer-Sounds (etwa des DX-7) wurden nicht vom einzelnen Musiker kreiert, sondern von Experten und kommerziell vertrieben
- Den Möglichkeiten des Syntheseverfahrens steht musikpraktisch eine gewisse klanglich Uniformität gegenüber
- Die früher wichtige Möglichkeit der Nachbildung natürlicher Instrumente wurde mit den Möglichkeiten des Samplings und geringeren Kosten für Speicherplatz obsolet



Klangsynthese: Waveshaping

Beim *waveshaping* wird über eine *shaping*-Funktion (Übertragungsfunktion), die in einer Tabelle gespeichert ist, ein Eingangssignalwert x einem Ausgangssignalwert y zugeordnet.

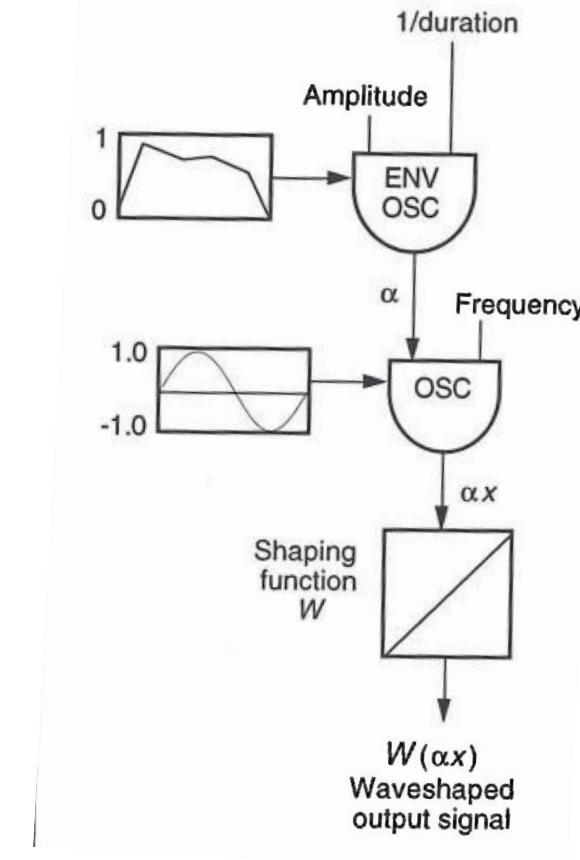


Abb. Roads 1996, 253.

Klangsynthese: Waveshaping

Beim *waveshaping* wird über eine *shaping*-Funktion (Übertragungsfunktion), die in einer Tabelle gespeichert ist, ein Eingangssignalwert x einem Ausgangssignalwert y zugeordnet.

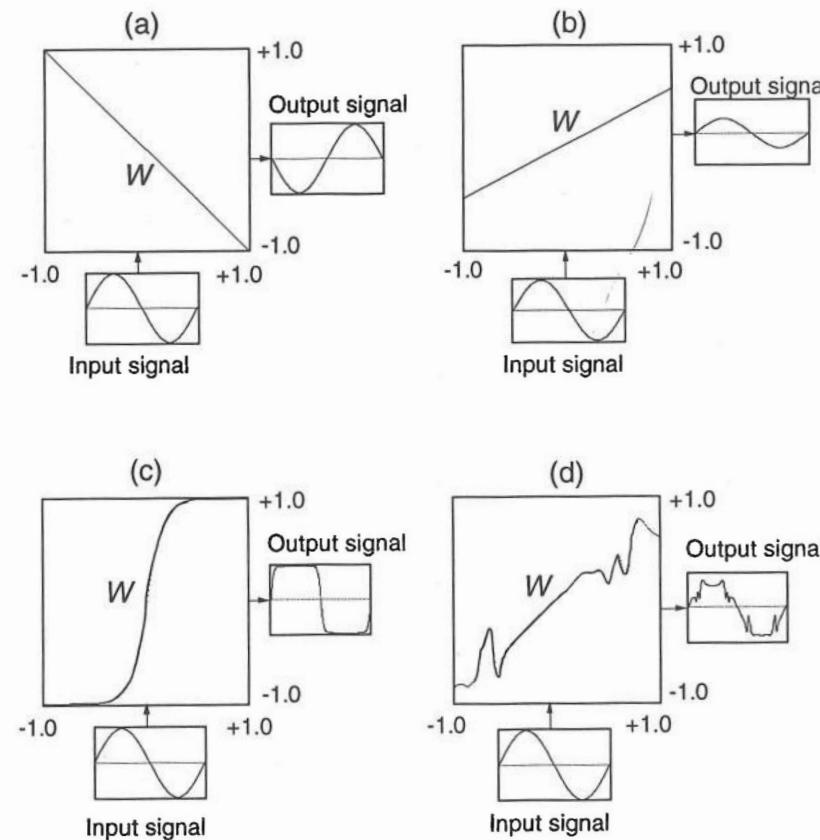


Abb. Roads 1996, 255.

Klangsynthese: Waveshaping

Beim *waveshaping* wird über eine *shaping*-Funktion (Übertragungsfunktion), die in einer Tabelle gespeichert ist, ein Eingangssignalwert x einem Ausgangssignalwert y zugeordnet.

Vorteile:

- Wie bei realen Instrumenten auch, ist das resultierende Spektrum abhängig von der Amplitude des Eingangssignals.
- Allein durch die Veränderung der Amplitude des Eingangssignals (durch Multiplikation mit einem Faktor oder durch Addition eines konstanten Wertes), kann der Klang des Ausgangssignals verändert werden.

Problem:

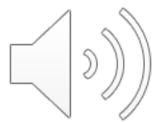
Von einer willkürlich gewählten Übertragungsfunktion lässt sich nicht auf das resultierende Spektrum des Ausgangssignals schließen

Lösung:

Verwendung von Übertragungsfunktionen mit definiertem Frequenzverhalten (Tschebyscheff-Polynome).

Klangsynthese: Waveshaping

Waveshaper mit einer Übertragungsfunktion bestehend aus Tschebyscheff-Polynomen



Klangbeispiel: Interaktives Waveshaping-System von Larry Polansky mit sechs Waveshapern und Feedback, Flöte: Anne La Berge (Mitte 1980er Jahre).

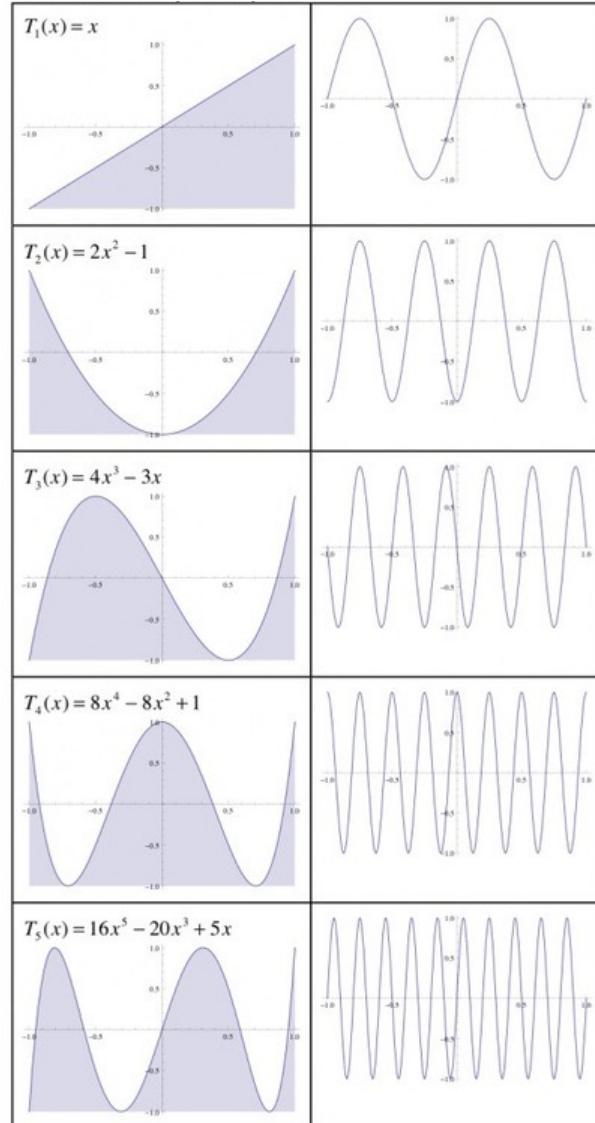


Abb.: Übertragungsfunktion als Tschebyscheff-Polynom der 1. bis 5. Ordnung und resultierendes Ausgangssignals bei sinusförmigen Eingangssignal (<https://www.stuartjames.com/sound-design.html>).

Klangsynthese: Granularsynthese

Erstmals beschrieben von Dennis Gabor (1946, 1947).

Grundidee: Klänge werden durch eine Vielzahl von sehr kurzen (typischerweise 1 ms bis 100 ms dauernden) Klangereignissen (*grains*) repräsentiert.

Vorteil: Diese Repräsentation kombiniert Informationen zum Zeitbereich (Startzeitpunkt, Dauer, Form der Hüllkurve, Verlauf der Wellenform) und Informationen zum Frequenzbereich (Periodendauer der Wellenform innerhalb eines *grains*, das Spektrum der Wellenform innerhalb einer *grains*).

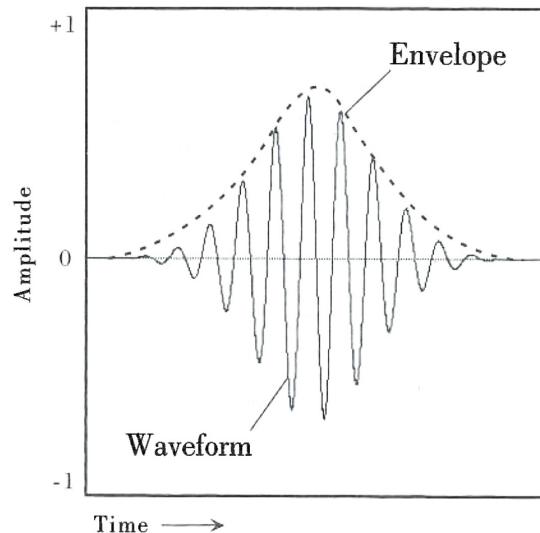


Abb. Roads 2001, 87

Klangsynthese: Granularsynthese

Erstmals beschrieben von Dennis Gabor (1946, 1947).

Grundidee: Klänge werden durch eine Vielzahl von sehr kurzen (typischerweise 1 ms bis 100 ms dauernden) Klangereignissen (*grains*) repräsentiert.

Vorteil: Diese Repräsentation kombiniert Informationen zum Zeitbereich (Startzeitpunkt, Dauer, Form der Hüllkurve, Verlauf der Wellenform) und Informationen zum Frequenzbereich (Periodendauer der Wellenform innerhalb eines *grains*, das Spektrum der Wellenform innerhalb einer *grains*).

„All sound, even continuous musical variation, is conceived as an assemblage of a large number of elementary sounds adequately disposed in time. In the attack, body, and decline of a complex sound, thousands of pure sounds appear in a more or less short interval of time Δt .“ (Xenakis, 1992)

Granularsynthese

Klangbeispiel 1: Iannis Xenakis, *Analogique A et B* (1958-59)



Granularsynthese

Erste computerbasierte Implementierung durch Curtis Roads 1974.

Klangbeispiel 2: *Klang-1*, erstes Experiment zur Realisierung einer computerbasierten Granularsynthese (Curtis Roads, Dezember 1974)



Granularsynthese

Grains können synthetisch erzeugt werden oder sample-basiert sein.

Jedes *grain* kann hinsichtlich einer Reihe von Parametern spezifiziert werden:

- Dauer
- Hüllkurve
- Frequenz
- Position im Soundfile (bei sample-basierten *grains*)
- Räumliche Position
- Wellenform (als Inhalt eines Wavetables bzw. als Auswahl eines Samples)

Granularsynthese

Prinzip-Schaltung eines Instruments zur Granular Synthese

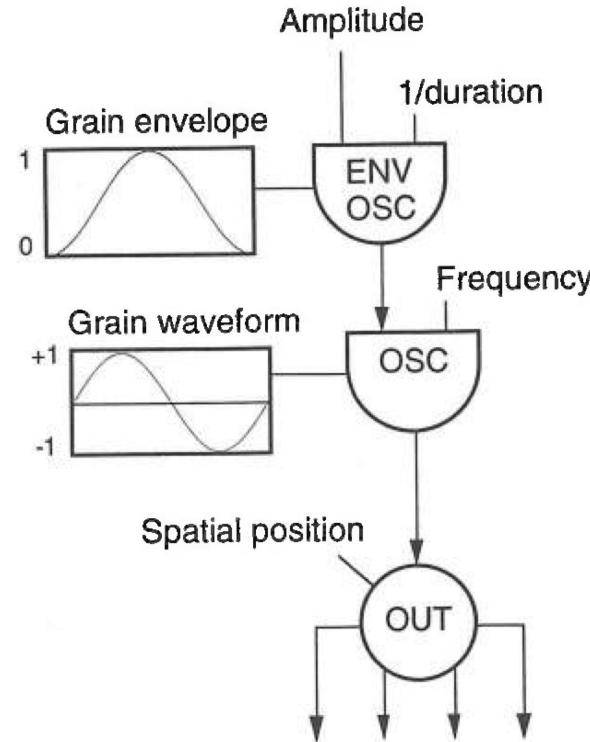


Abb. Roads 1996, 172

Granularsynthese

Grains können synthetische erzeugt werden oder sample-basiert sein.

Jedes *grain* kann hinsichtlich einer Reihe von Parametern spezifiziert werden:

- Dauer
- Hüllkurve
- Frequenz
- Position im Soundfile (bei sample-basierten *grains*)
- Räumliche Position
- Wellenform (als Inhalt eines Wavetables bzw. als Auswahl eines Samples)

Ein weiterer Parameter ist die Dichte an *grains* pro Sekunde.

Bei n Parametern und durchschnittlich d *grains* pro Sekunde ergibt sich ein Bedarf von zu spezifizierenden Parametern von $n \times d$.

z.B.
6 *grain*-bezogene Parameter (s.o.)
x 300 *grains* pro Sekunde (vgl. Xenakis Analogique A et B)
= 1800 Parameter pro Sekunde

→ Es ist eine Parameterkontrolle höherer Ordnung erforderlich.

Granularsynthese: Parameterkontrolle

Beispiel 1: Fourier- oder Wavelet basierte Raster

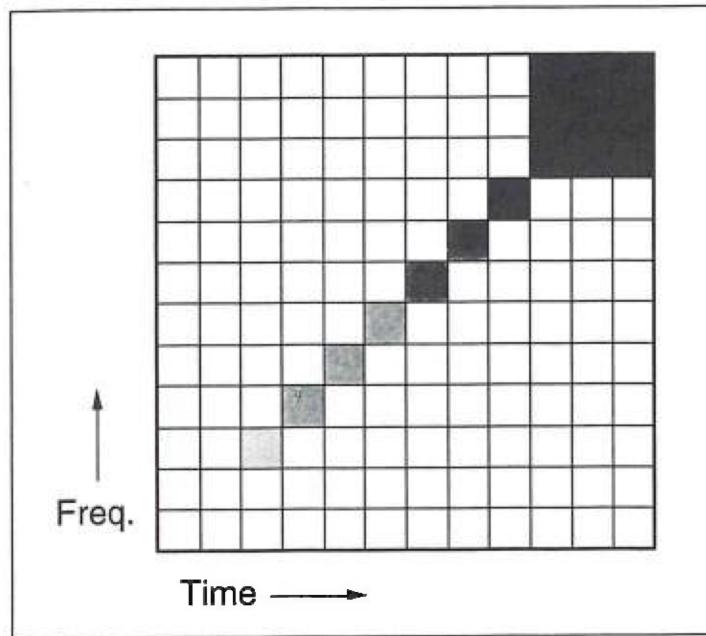


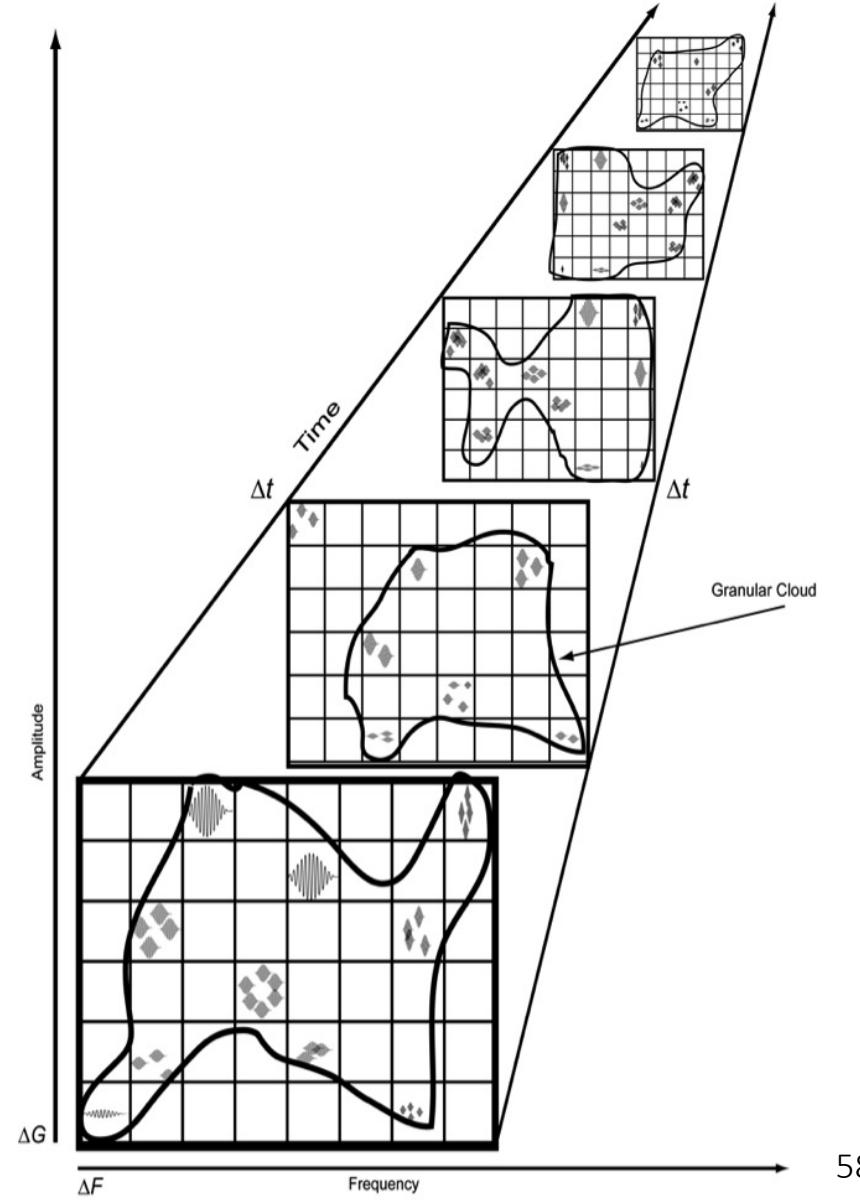
Abb. Roads 1996, 173

Granularsynthese: Parameterkontrolle

Beispiel 1: Fourier- oder Wavelet basierte Raster

Vgl. das Konzept der *screens* bei Xenakis, *Analogique A et B*

„All sound, even continuous musical variation, is conceived as an assemblage of a large number of elementary sounds adequately disposed in time. In the attack, body, and decline of a complex sound, thousands of pure sounds appear in a more or less short interval of time Δt .“ (Xenakis, 1992)



Granularsynthese: Parameterkontrolle

Beispiel 2: Asynchrone Granularsynthese

Die Asynchrone Granularsynthese verfolgt nicht das Konzept einer kontinuierlichen Folge von *grains* (vgl. pitch-synchrone Granularsynthese sowie synchrone und quasi-synchrone Granularsynthese). Stattdessen wird eine statistische Verteilung von *grains* in einer „Wolke“ definiert.

Zu definierende Parameter:

1. Startzeitpunkt und Dauer der Klangwolke
2. Dauer der *grains* (veränderlich über die Dauer der Klangwolke)
3. Dichte (*grains* pro Sekunde)
4. Frequenzband in dem sich die Klangwolke bewegt
5. Amplitudenverlauf der Klangwolke
6. Wellenformen innerhalb der *grains*
7. Räumliche Verteilung der Klangwolke

Granularsynthese: Parameterkontrolle

Beispiel 2: Aysnchrone Granularsynthese

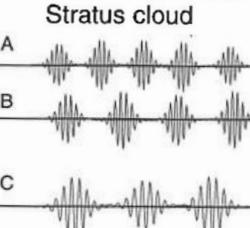
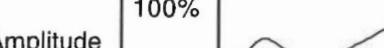
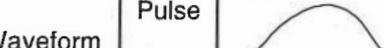
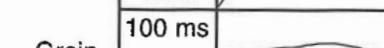
	Basic specification		Alternative specifications
	1	2	3
Frequency band	22 KHz	Cumulus cloud	Stratus cloud A B C
	0 Hz		
Grain density	100%		
	0%		
Amplitude	100%		
	0%		
Spatial distribution	Left		Random spatial dispersion
	Right		
Waveform	Pulse		Random waveform mixture
	Sine		
Grain duration	100 ms		Random duration
	1 ms		Frequency-dependent duration

Abb. Roads 1996, 178

Granularsynthese: Manipulation von Samples

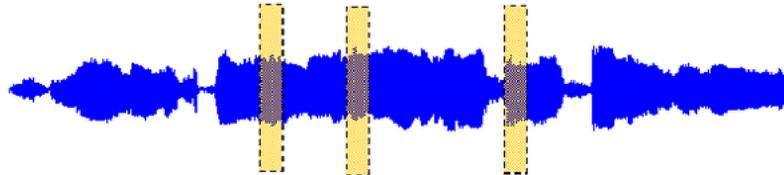
Mithilfe einer sample-basierten Granularsynthese können Tonhöhe und Geschwindigkeit unabhängig voneinander manipuliert werden.

Bei der Manipulation von Samplen spielen zwei Aspekte eine Rolle:

- Anordnung der *grains* beim Auslesen eines Samples
- Anordnung der *grains* beim Schreiben eines neuen Samples

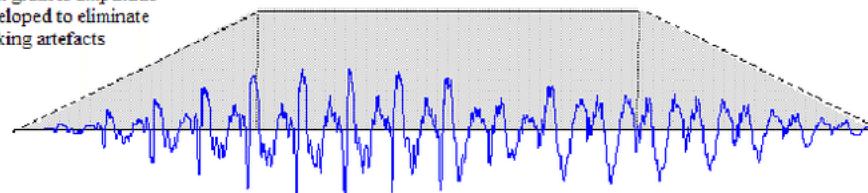
SELECTION

Grains are selected from source
waveforms



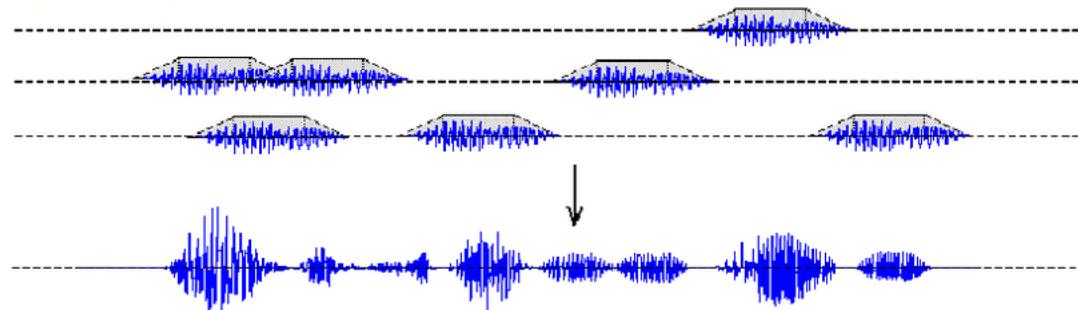
ENVELOPE

Each grain is amplitude
enveloped to eliminate
clicking artefacts



SUMMATION

A large number of grains, drawn from a number of sources are then
summed to produce the output



Granularsynthese: Manipulation von Samples

Mithilfe einer sample-basierten Granularsynthese können Tonhöhe und Geschwindigkeit unabhängig voneinander manipuliert werden.

Bei der Manipulation von Samplen spielen zwei Aspekte eine Rolle:

- Anordnung der grains beim Auslesen eines Samples
- Anordnung der grains beim Schreiben eines neuen Samples

Klangbeispiel 3: Granulation



(Roads, *Microsound* 2001: Klangbeispiel 46)

Granularsynthese: Manipulation von Samples

Mithilfe einer sample-basierten Granularsynthese können Tonhöhe und Geschwindigkeit unabhängig voneinander manipuliert werden.

Bei der Manipulation von Samplen spielen zwei Aspekte eine Rolle:

- Anordnung der grains beim Auslesen eines Samples
- Anordnung der grains beim Schreiben eines neuen Samples

Klangbeispiel 4: Pitch-Shifting



(Roads, *Microsound* 2001: Klangbeispiel 48)

Granularsynthese: Manipulation von Samples

Mithilfe einer sample-basierten Granularsynthese können Tonhöhe und Geschwindigkeit unabhängig voneinander manipuliert werden.

Bei der Manipulation von Samplen spielen zwei Aspekte eine Rolle:

- Anordnung der grains beim Auslesen eines Samples
- Anordnung der grains beim Schreiben eines neuen Samples

Klangbeispiel 5: Time-Stretching und Shrinking



(Roads, *Microsound* 2001: Klangbeispiel 49)

Granularsynthese: Manipulation von Samples

Mithilfe einer sample-basierten Granularsynthese können Tonhöhe und Geschwindigkeit unabhängig voneinander manipuliert werden.

Bei der Manipulation von Samplen spielen zwei Aspekte eine Rolle:

- Anordnung der *grains* beim Auslesen eines Samples
- Anordnung der *grains* beim Schreiben eines neuen Samples

Klangbeispiel 6: Curtis Roads, *Pictor Alpha* (2003)



Klangsynthese: Physical Modeling

Ausgangspunkt: Mathematische Modelle zur Beschreibung des mechanischen und akustischen Verhaltens gespielter Instrumente

Wissenschaftliches Interesse: Je besser das mathematische Modell und die Simulation eines Instruments, desto besser dessen Verständnis.

Künstlerisches Interesse: Kreation neuer virtueller ansonsten nicht realisierbarer Instrumente (in Bezug auf Größe, Material oder deren dynamische Veränderung)

Präzision der Modellierung  Effizienz und Anwendbarkeit

Klangsynthese: Physical Modeling als parametrische Synthese

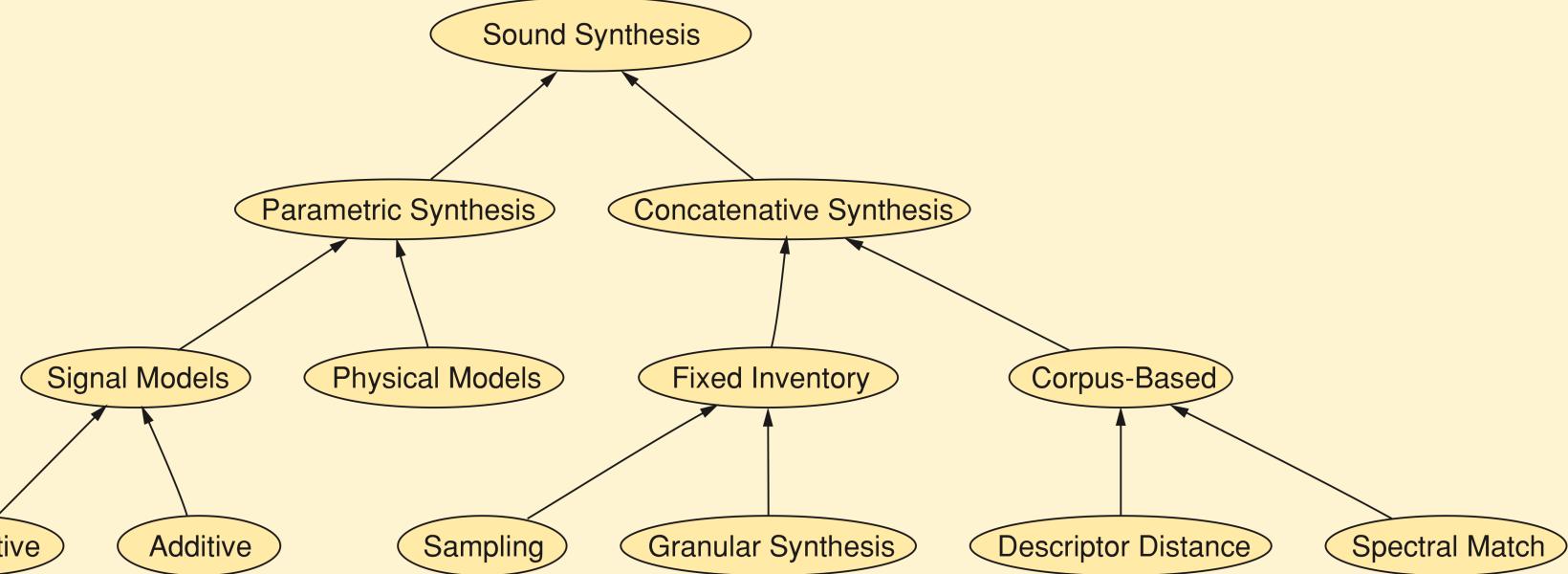


Abb.: Schwarz 2007, 94.

Klangsynthese: Physical Modeling

1877/78 John William Strutt (Lord Rayleigh), *The Theory of Sound*

1962 John Kelly, Carol Lochbaum: erste Implementierung von Sprachsynthese mithilfe eines digitalen Computersystems
→ in Zusammenarbeit mit Max Matthews: *Daisy Bell (Bycicle Built for Two)* (1962)

Weitere Entwicklungen in den 1960er und 70er Jahren durch

Lejaren Hiller, James Beauchamp, Pierre Ruiz (University of Illinois)
Ercolino Feretti (MIT, Harvard University und University of Utah)

Breitere Anwendung erst durch spätere Entwicklungen

1980er Karplus-Strong-Algorithmus zur Modellierung gezupfter Saiten und von Schlagzeugklängen

1990er Waveguide-Synthese ermöglichte auch die Modellierung von Blasinstrumenten

Klangsynthese: Physical Modeling

Unterscheidung zwischen Anregung (*excitation*) und der Resonanz (*resonance*).

Anregung: z.B. blasen, streichen mit einem Bogen, schlagen mit einem Schlägel
nicht-lineares Verhalten, d.h. ab einer gewissen Schwelle der eingebrachten Energie ändert sich das Verhalten des Systems (vgl. Überblasen, Multiphonics)

Resonanz: Schwingungsverhalten des Instruments
in der Regel lineares Verhalten

Verhältnis von Anregung und Resonanz

Entkoppelt lediglich Energiefluss vom Anreger zum Resonator (*feedforward*)

Gekoppelt Interaktion zwischen den Schwingungen des Resonators und der Anregung (z.B. beim Saxophonspiel)

Physical Modeling: Feder-Masse-Modell

Ansatz: Modellierung schwingender Saiten als Reihe diskreter Massen, die über Federn miteinander verbunden sind (z.B. Hiller und Ruiz 1971).

- Beschreibung von *Dichte* und *Elastizität* schwingender Medien
- Modellierung von Longitudinal- und Transversalschwingungen, auch schwingender Membrane oder Volumina
- Die Anregung einer Saite (durch Zupfen, Streichen oder Schlagen) kann als Krafteinwirkung auf ein Einzelnes Masse-Elemente beschrieben werden, dass die Kraft über die Federn auf andere Masse-Elemente überträgt

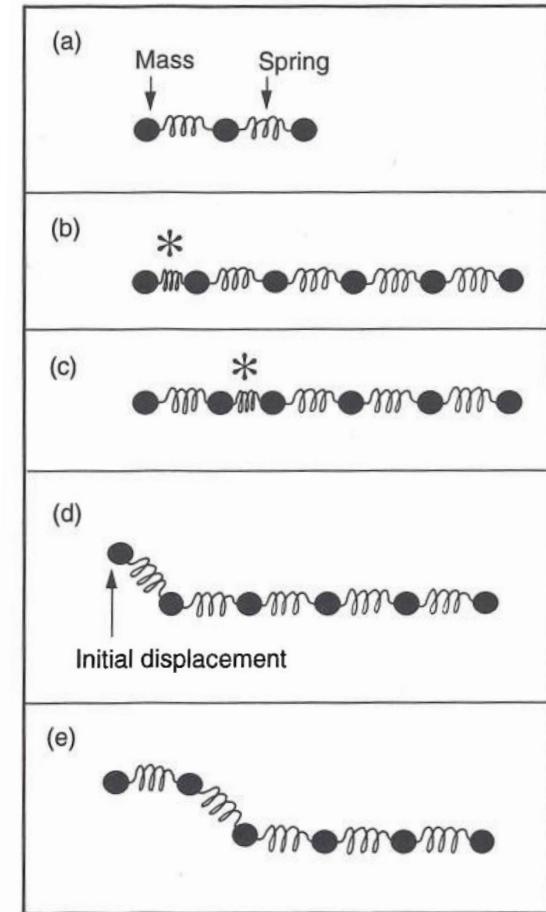


Abb.: Roads 1996, 272

Physical Modeling: Modal-Synthese

Ansatz: Ein Instrument wird als Kombination schwingender Bestandteile (Substrukturen) beschrieben (z.B. Saite, Steg und Resonanzkörper einer Violine).

“The motion of a complicated system having many moving parts may always be regarded as compounded from simpler motion, called modes, all going on at once. No matter how complicated the system, we will find that each one of its modes has properties very similar to those of a simple harmonic oscillator.”

(Crawford 1968, zit. nach Roads 1996, 273)

- Für jede Substruktur werden Schwingungseigenschaften und Form der auftretenden Schwingungsmoden definiert.
- Zur Modellierung werden weitaus weniger Substrukturen benötigt, als Masse-Elemente und Federn im Feder-Masse-Modell.
- Flexibel aufgrund der Modularität: dynamische Veränderung durch Hinzufügen oder Entfernen von Substrukturen; auch ungewöhnliche Kombinationen von Substrukturen möglich.

Anwendung: MOSAIC (Jean-Marie Adrien, Joseph Morrison 1991)

Physical Modeling: Waveguide-Synthesis

Ansatz: Definition eines Wellenleiters (einer Röhre oder einer Saite), durch die sich Wellen in unterschiedlichen Richtungen ausbreiten und überlagern, wobei Resonanzen und Interferenzen entstehen.

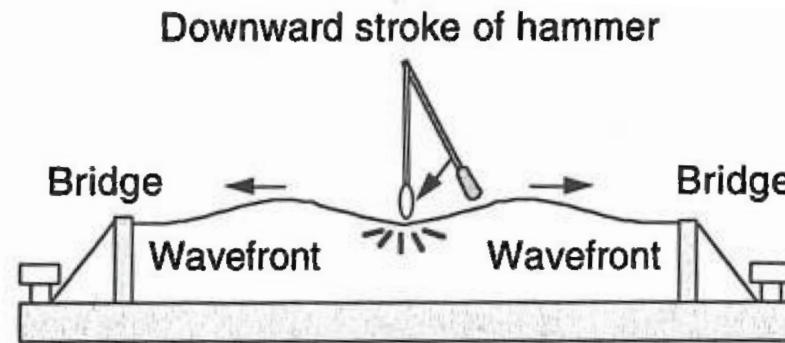


Abb.: Roads 1996, 283

Physical Modeling: Waveguide-Synthesis

Ansatz: Definition eines Wellenleiters (einer Röhre oder einer Saite), durch die sich Wellen in unterschiedlichen Richtungen ausbreiten und überlagern, wobei Resonanzen und Interferenzen entstehen.

Grundelement ist eine bidirektionale Verzögerungsleitung (*bidirectional delay line*).

- *Nonlinear excitation*: anregendes Signal
- *Scattering junctions*: z.B. der Steg einer Violine wirkt als Streuknoten, an dem die Energie teilweise reflektiert und teilweise (an den Resonanzkörper) weitergeleitet wird.
- *Filter*: Modellierung des Resonanzkörpers

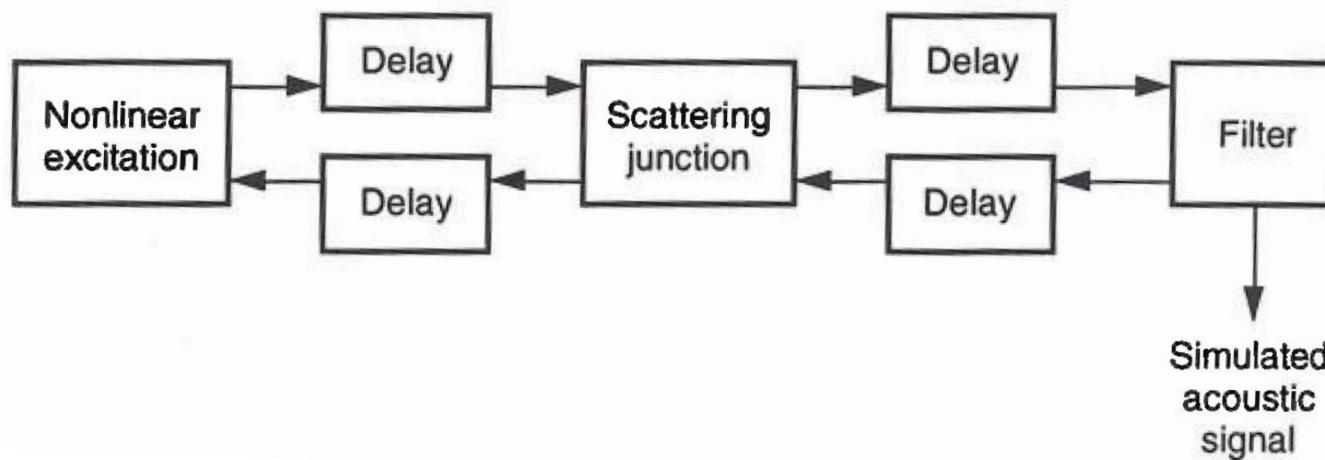
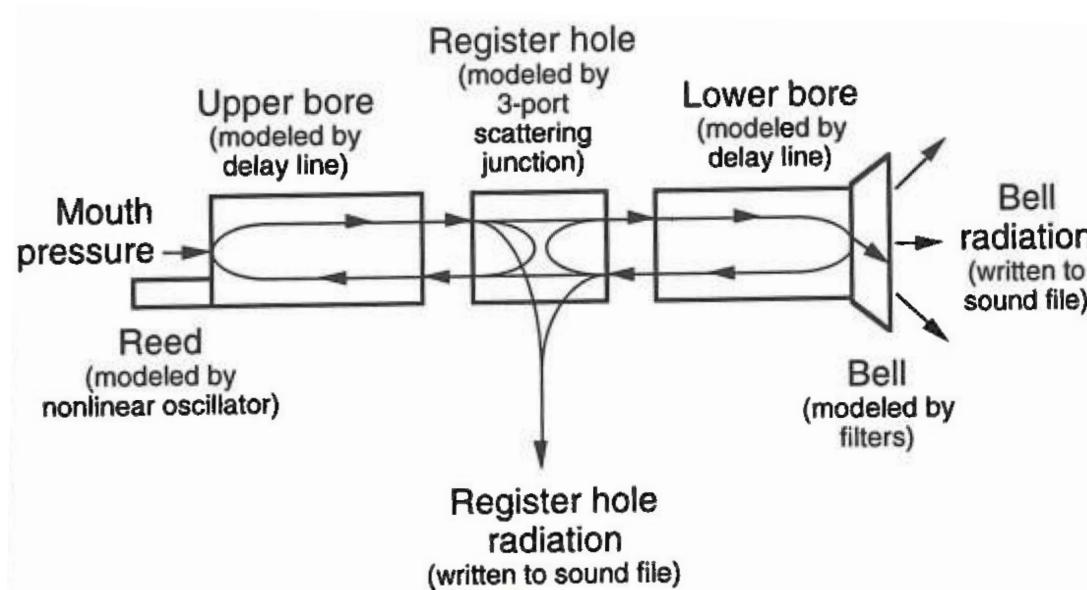


Abb.: Roads 1996, 283

Physical Modeling: Waveguide-Synthesis

Waveguide Klarinette (Hirschman, Cook, Smith 1991)

Modell mit fünf Komponenten: Rohrblatt, oberer Rohrabschnitt, Griffloch, unterer Rohrabschnitt, Trichter



Das Modell benötigt nur ein einziges Griffloch (bzw. eine Klappe), da die Länge des oberen und unteren Rohrabschnitts (d.h. der Verzögerungszeit) in Abhängigkeit von der gespielten Tonhöhe verändert werden kann.

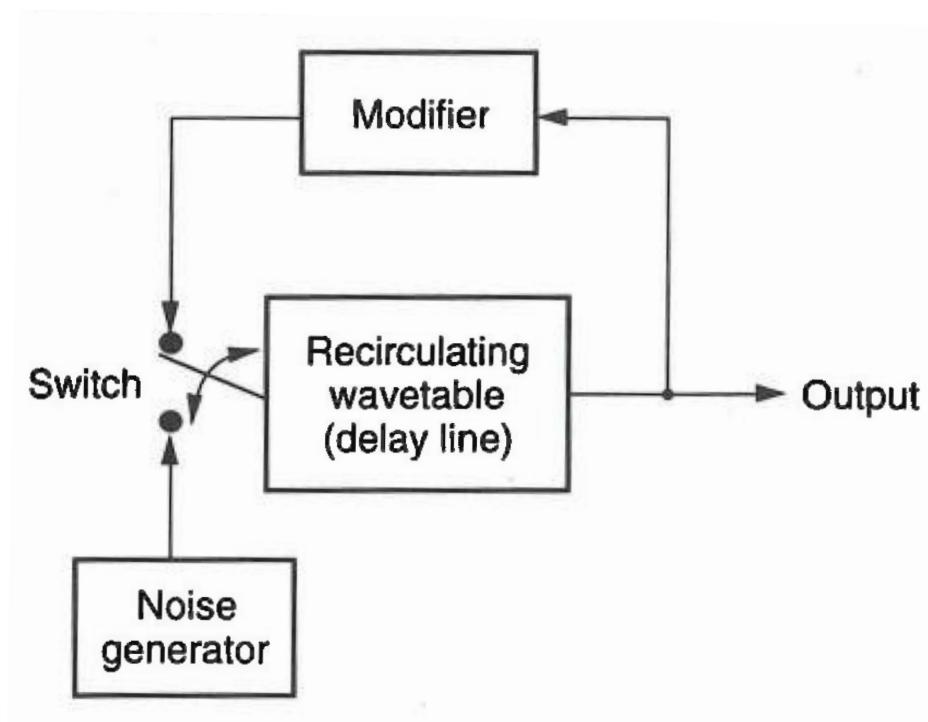
(Abb. Roads 1996, 285)

Physical Modeling: Karplus-Strong-Synthesis

Ansatz (nach Kevin Karplus und Alex Strong):

Modellierung von gezupften Saiten und Schlagzeugklängen mithilfe der dynamischen Veränderung eines Wavetables.

Karplus, K., and A. Strong (1983)



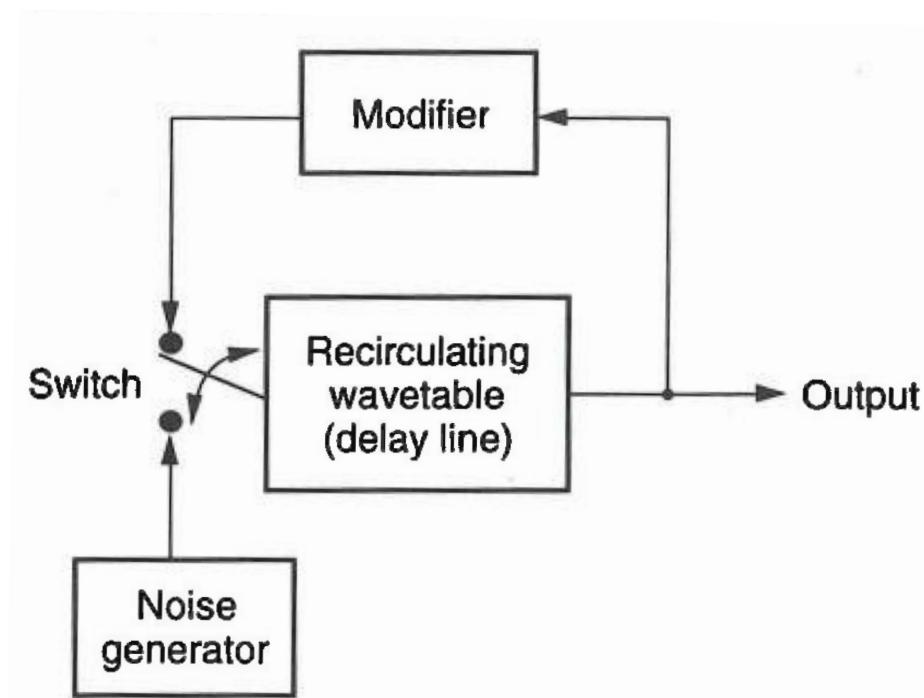
(Abb. Roads 1996, 294)

Physical Modeling: Karplus-Strong-Synthesis

Ansatz (nach Kevin Karplus und Alex Strong):

Modellierung von gezupften Saiten und Schlagzeugklängen mithilfe der dynamischen Veränderung eines Wavetables.

- Zunächst wird das Wavetable mit Zufallswerten beschrieben;
- In der Folge werden die Samples innerhalb des Wavetables in einem iterativen Prozess sukzessive durch gemittelte Samples ersetzt;
- Die hierdurch erreichte Tiefpass-Wirkung nimmt stetig zu, bis die Werte im Wavetable konstant sind;
- Durch diesen Algorithmus wird das Ausklingen einer gezupften Saite simuliert: vom quasi-chaotischen Zustand zu Beginn, über das vergleichsweise schnelle Abklingen hochfrequenter Anteile, bis hin zum völligen Ausschwingen.



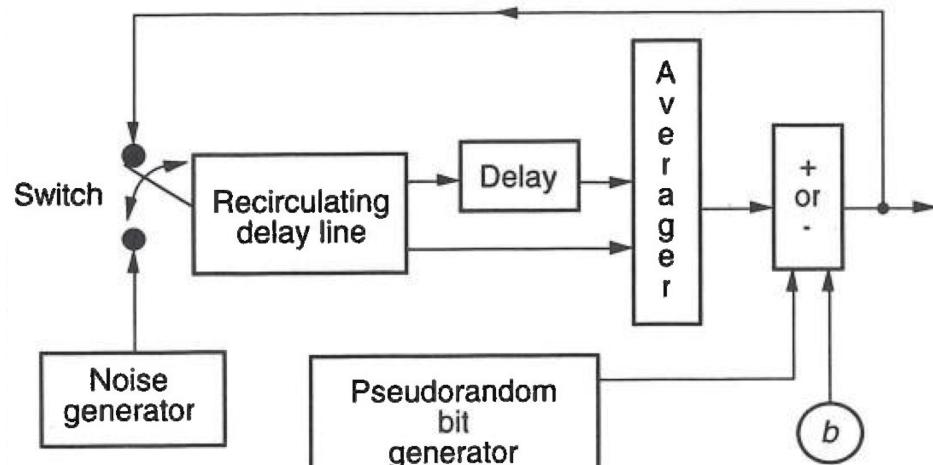
(Abb. Roads 1996, 294)

Physical Modeling: Karplus-Strong-Synthesis

Ansatz (nach Kevin Karplus und Alex Strong):

Modellierung von gezupften Saiten und Schlagzeugklängen mithilfe der dynamischen Veränderung eines Wavetables.

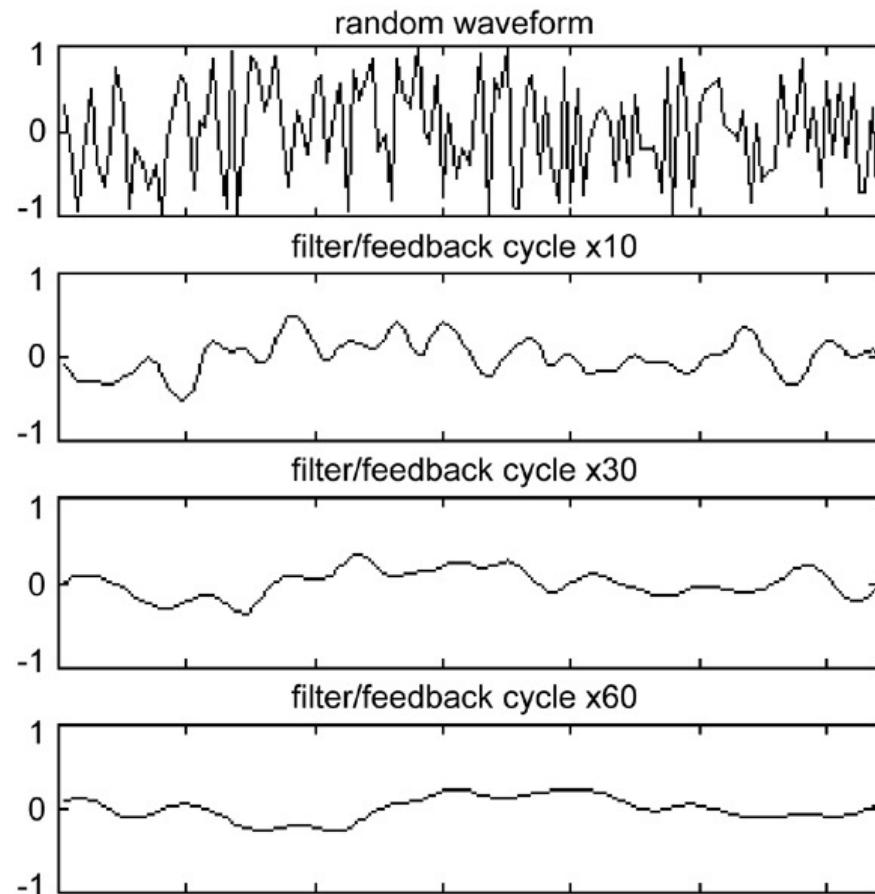
- Zunächst wird das Wavetable mit Zufallswerten beschrieben;
- In der Folge werden die Samples innerhalb des Wavetables in einem iterativen Prozess sukzessive durch gemittelte Samples ersetzt;
- Die hierdurch erreichte Tiefpass-Wirkung nimmt stetig zu, bis die Werte im Wavetable konstant sind;
- Durch diesen Algorithmus wird das Ausklingen einer gezupften Saite simuliert: vom quasi-chaotischen Zustand zu Beginn, über das vergleichsweise schnelle Abklingen hochfrequenter Anteile, bis hin zum völligen Ausschwingen.
- Werden in den Prozess der stetigen Neubeschreibung des Wavetables Zufallswerte eingestreut, können Schlagzeugklänge simuliert werden.



Physical Modeling: Karplus-Strong-Synthesis

Inhalt des Wavetbles im Initialzustand und nach 10, 30 und 60 Berechnungszyklen eines Karplus-Strong-Algorithmus.

Klangbeispiel 1: Gezupfte Saiten einer Violine

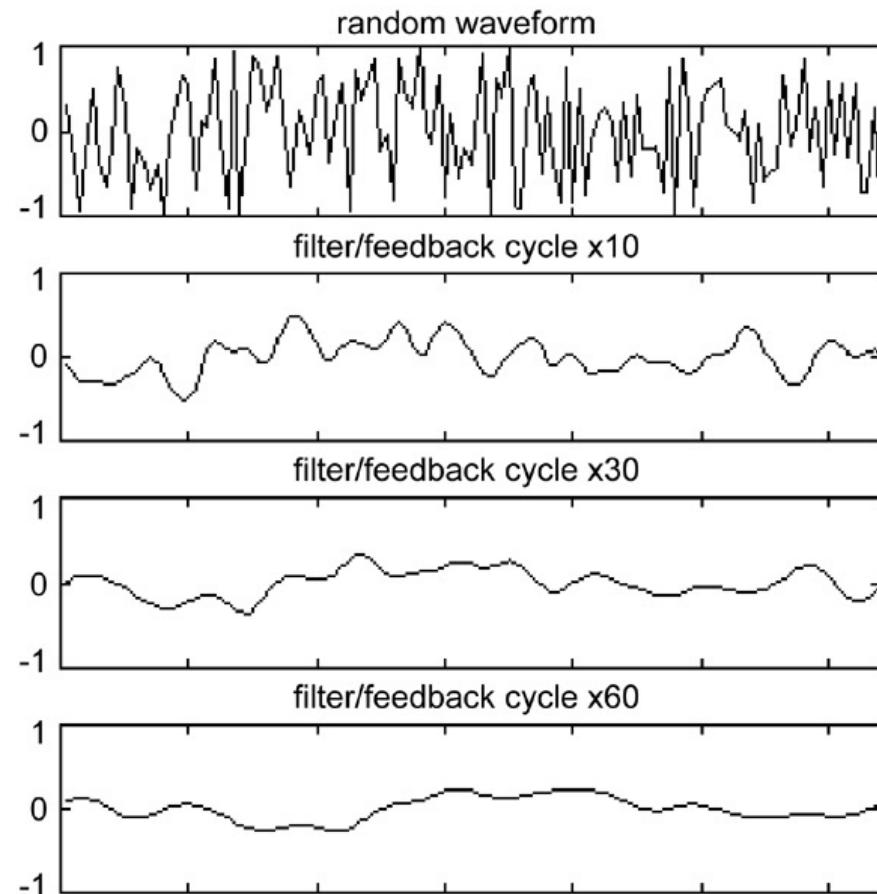


(Abb.: http://sites.music.columbia.edu/cmc/MusicAndComputers/chapter4/04_09.php)

Physical Modeling: Karplus-Strong-Synthesis

Inhalt des Wavetbles im Initialzustand und nach 10, 30 und 60 Berechnungszyklen eines Karplus-Strong-Algorithmus.

Klangbeispiel 1: Simulation gezupfter Saiten mithilfe des Karplus-Strong-Algorithmus



(Abb.: http://sites.music.columbia.edu/cmc/MusicAndComputers/chapter4/04_09.php)

Physical Modeling: Formant-Synthese

Ansatz: Formanten definieren die spektralen Charakteristika eines Instrumentes, das somit durch entsprechende Filterung modelliert werden kann.

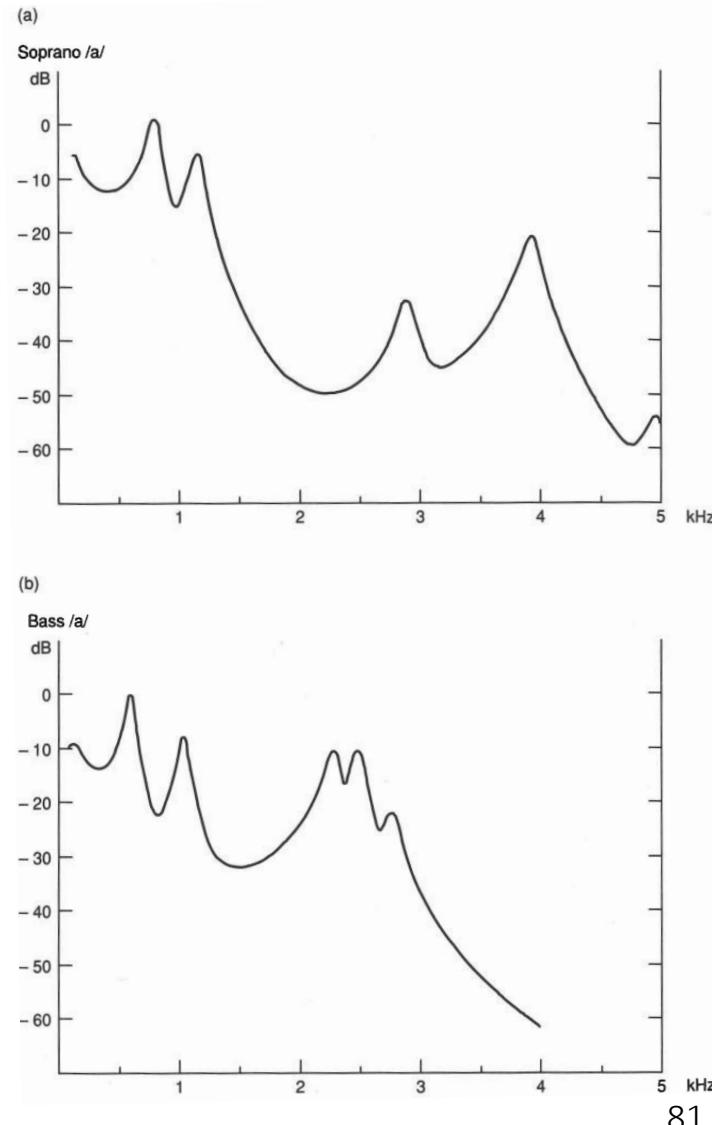


Abb.: Vocalformanten bei gesungenen a eines Soprans (a) und eines Baritons (b), Roads 1996, 298.

Physical Modeling: Formant-Synthese

Ansatz: Formanten definieren die spektralen Charakteristika eines Instrumentes, das somit durch entsprechende Filterung modelliert werden kann.

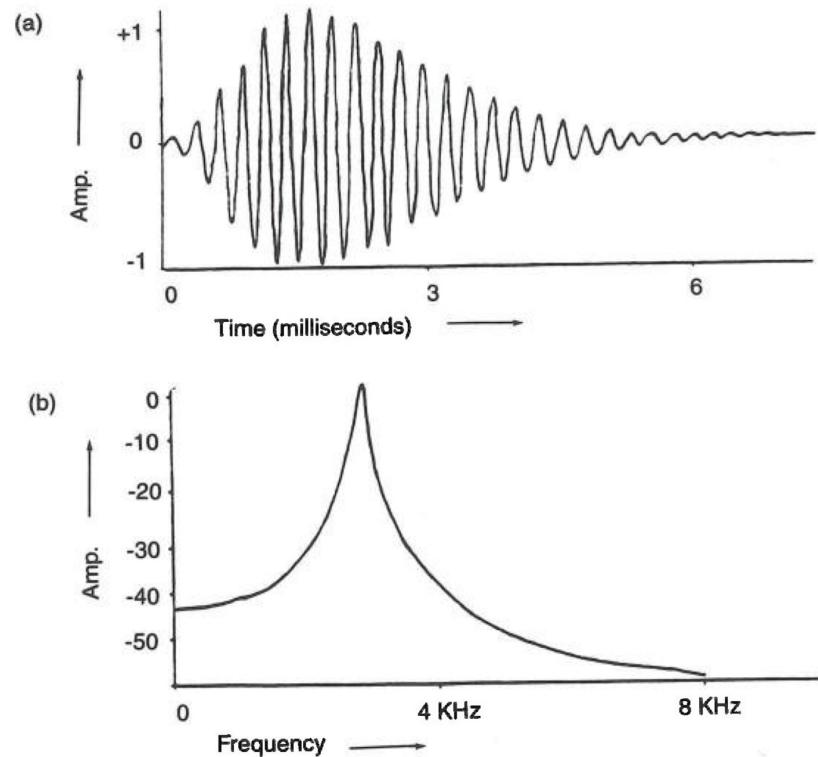


Abb.: (a) Zeitsignal des Impulses eines FOF-Generators;
(b) Frequenzspektrum desselben Impulses
(Roads 1996, 302)

Physical Modeling: Formant-Synthese

Ansatz: Formanten definieren die spektralen Charakteristika eines Instrumentes, das somit durch entsprechende Filterung modelliert werden kann.

Alternative Modellierung mittels *formant wave-function-synthesis (FOF-synthesis)*:

- Anreger ist eine Impulsfolge
- Anstatt Filtern können auch gedämpfte Sinusgeneratoren verwendet werden
- sehr kurze, mit einer Hüllkurve multiplizierte Sinussignale werden bei jedem eingehenden Impuls generiert („FOF-grains“)
- Die Filterung erfolgt hier quasi im Zeitbereich
 - Kurze Attack-Zeit → breitere spektrale Basis („skirtwidth“)
 - Lange Release-Zeit → schmalere Bandbreite der Resonanz

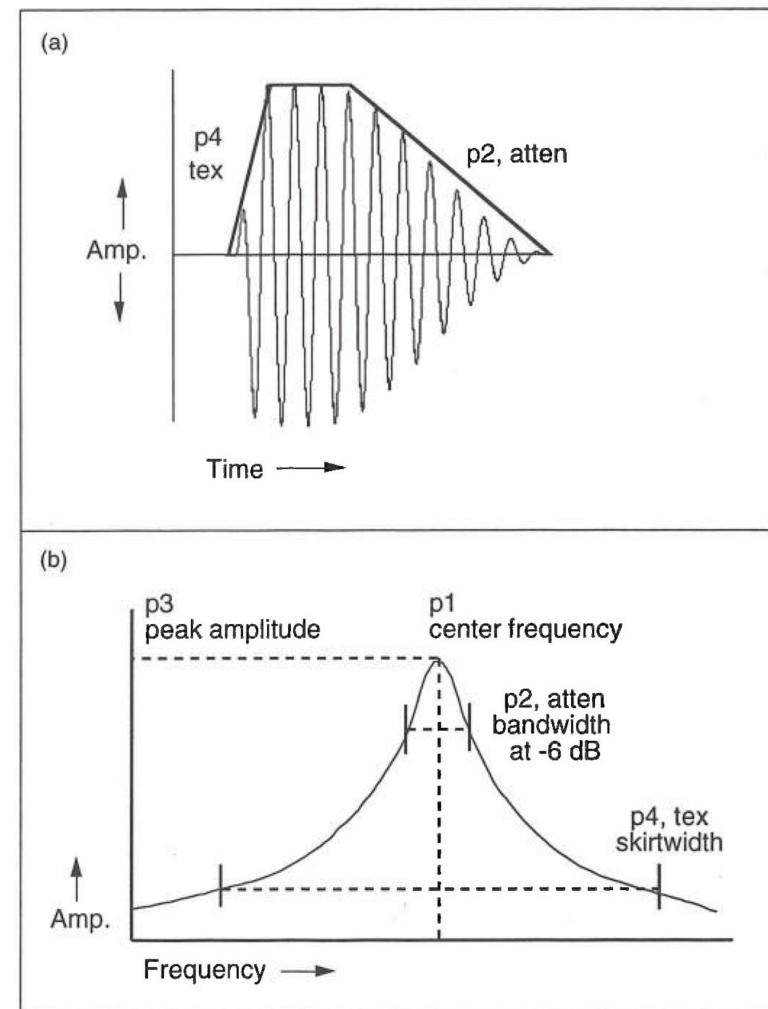


Abb.: Roads 1996, 302

Physical Modeling: Formant-Synthese

Ansatz: Formanten definieren die spektralen Charakteristika eines Instrumentes, das somit durch entsprechende Filterung modelliert werden kann.

Alternative Modellierung mittels *formant wave-function-synthesis (FOF-synthesis)*:

- Anreger ist eine Impulsfolge
- Anstatt Filtern können auch gedämpfte Sinusgeneratoren verwendet werden
- sehr kurze, mit einer Hüllkurve multiplizierte Sinussignale werden bei jedem eingehenden Impuls generiert („FOF-grains“)
- Die Filterung erfolgt hier quasi im Zeitbereich
 - Kurze Attack-Zeit → breitere spektrale Basis („skirtwidth“)
 - Lange Release-Zeit → schmalere Bandbreite der Resonanz
- Mischung mehrerer FOF-Generatoren

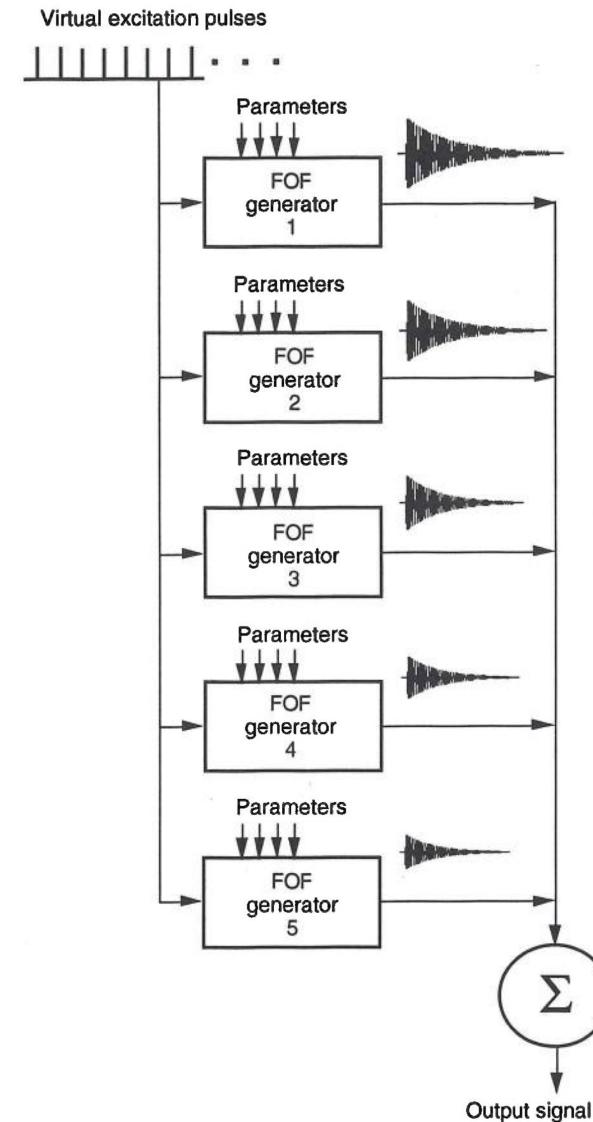


Abb.: Roads 1996, 302

Physical Modeling: Formant-Synthese

Beispiel für Implementierung der *formant wave-function-synthesis*: CHANT (IRCAM, 1980er Jahre)

Klangbeispiel: Gérard Grisey, *Les Chants de l'Amour* für 12 Stimmen und Tonband (1982-84), Part III



Physical Modeling: Formant-Synthese

Beispiel für Implementierung der *formant wave-function-synthesis*: CHANT (IRCAM, 1980er Jahre)

Klangbeispiel: Gérard Grisey, *Les Chants de l'Amour* für 12 Stimmen und Tonband (1982-84), Part IV



Physical Modeling: Formant-Synthese

Beispiel für Implementierung der *formant wave-function-synthesis*: CHANT (IRCAM, 1980er Jahre)

Klangbeispiel: Gérard Grisey, *Les Chants de l'Amour* für 12 Stimmen und Tonband (1982-84), Part V



„Nonstandard“ Sound Synthesis

Curtis Roads (1996, 319) bezeichnet jene Syntheseverfahren als „nonstandard“, die nicht die Simulation traditioneller Instrumentalklänge zum Ziel haben, sondern die Produktion neuer elektronischer Klänge.

Beispiele sind:

- *Waveform Segment Techniques* (z.B. Herbert Brün, SAWDUST; G.M. Koenig u. Paul Berg: SSP)
- *Graphic Synthesis* (z.B. Iannis Xenakis, UPIC)
- *Noise Modulations*
- *Stochastic Synthesis* (z.B. Iannis Xenakis, Gendy)

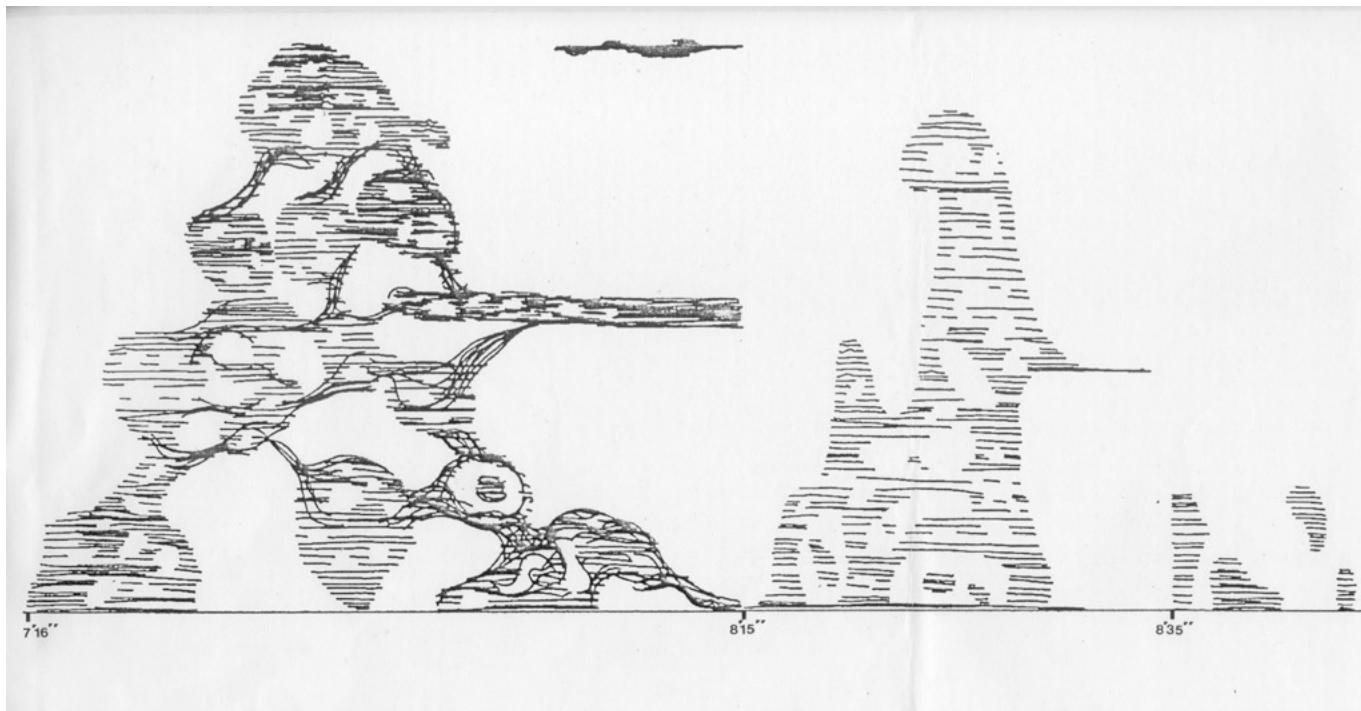


Abb. Iannis Xenakis, Ausschnitt *Mycenae Alpha* (graphische Eingabe für das UPIC-System)



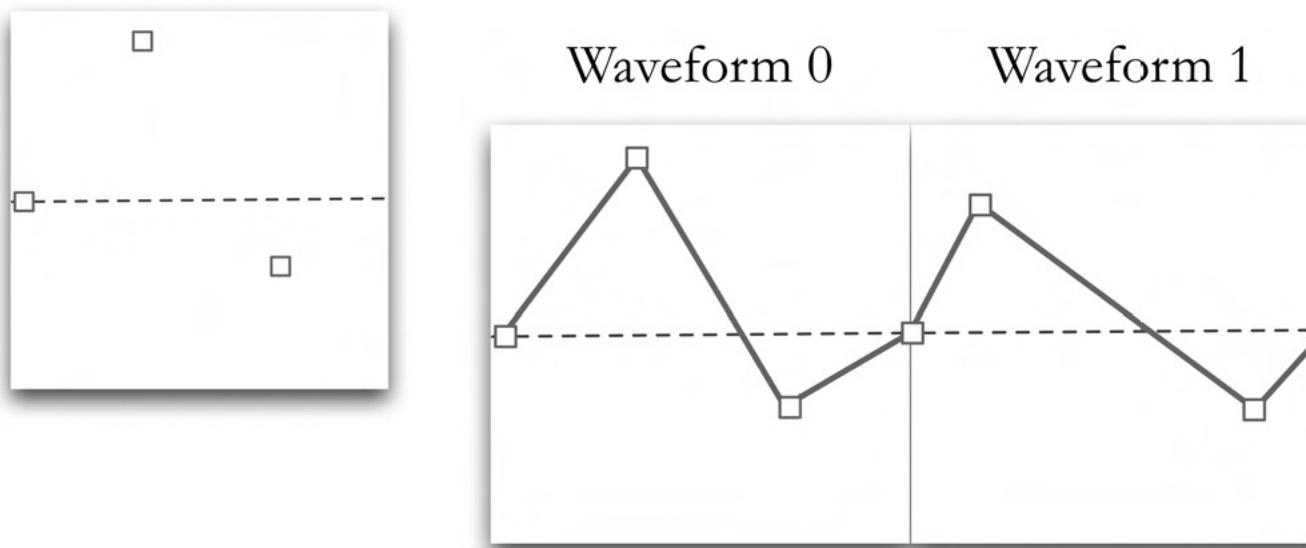
„Nonstandard“ Sound Synthesis

Curtis Roads (1996, 319) bezeichnet jene Syntheseverfahren als „nonstandard“, die nicht die Simulation traditioneller Instrumentalklänge zum Ziel haben, sondern die Produktion neuer elektronischer Klänge.

Beispiele sind:

- *Waveform Segment Techniques* (z.B. Herbert Brün, SAWDUST; G.M. Koenig u. Paul Berg: SSP)
- *Graphic Synthesis* (z.B. Iannis Xenakis, UPIC)
- *Noise Modulations*
- *Stochastic Synthesis* (z.B. Iannis Xenakis, Gendy)

Dynamic Stochastic Synthesis (Iannis Xenakis, *Gendy*)



„During my initial tests, I realized that probabilities could yield rich sonic results, but you have to control them—they are like wild horses! I have been working like a laborer to obtain interesting things from the [GENDY] program. I have been obliged to throw away many experimental results and keep only those that interested me.“

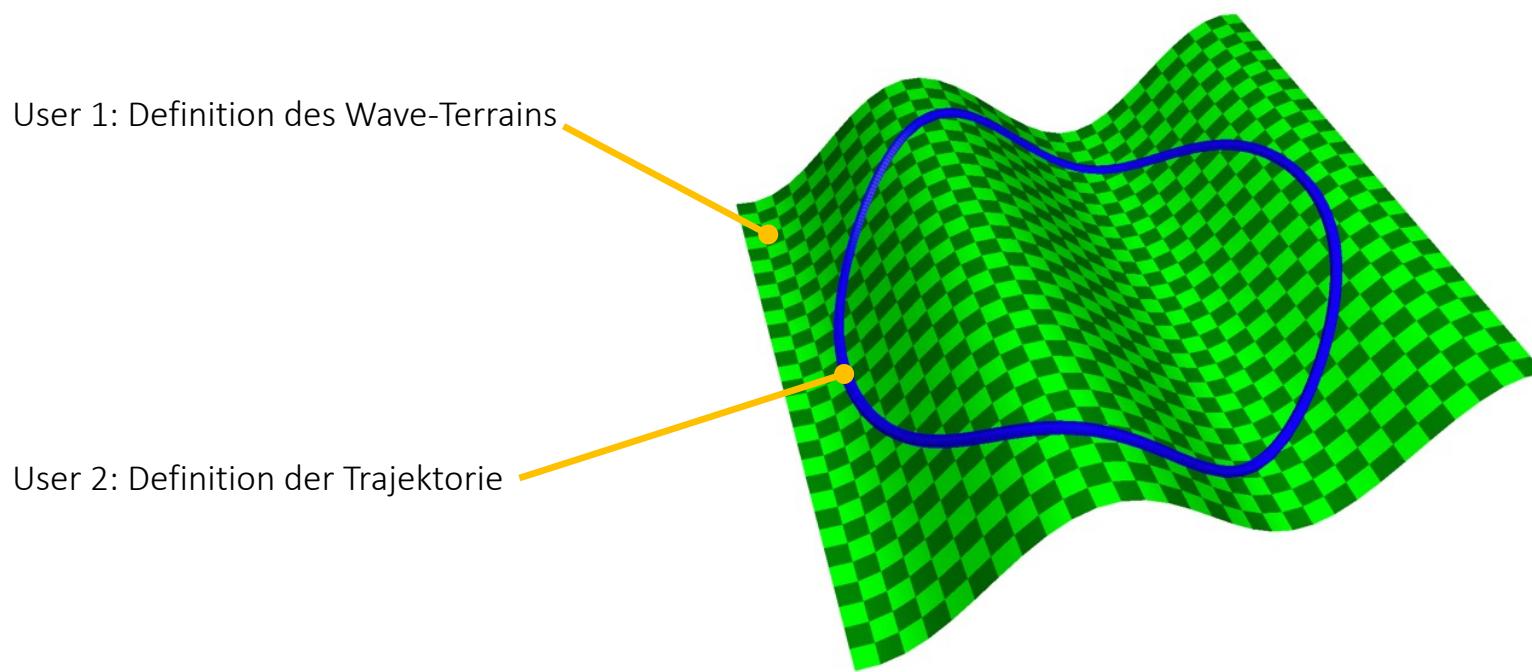
Iannis Xenakis (vgl. Sergio Luque 2009, 80)

Klangbeispiel: Iannis Xenakis, S.709 (1994)

Wave-Terrain Synthese

Die Samplefolge wird nicht durch das Auslesen eines Wavetables generiert, sondern folgt der Trajektorie durch einen dreidimensionalen Raum.

Bsp. System für die kollaborative dynamische Wave-Terrain-Synthese von Daniel Höpfner und Michele Samarotto (2019)



File Edit Options Buffers Tools SCLang Development YASnippet Help

```
1~tbus = Bus.audio(s, 1);

(
4Ndef(      , {
5    Impulse. (10);
6}).play(~tbus, addAction: 'addToHead');
7)

9Ndef(.).fadeTime = 2
10
11(
12Ndef(\u00d7, {
13    ar sig, freq, x, y, offsets, matr, t;
14
15    t = Ndef(\trigg);
16    t = t * Demand.ar(t, 0, Dwrand([0, 1], 2))
17
18    freq = [40, 77, 78, 79].midicps;
19
20    x = LFTri.ar(freq + 0.1) * 0.3 * SinOsc.ar(freq / 2);
21    y = SinOsc.ar(freq, pi / 2) * 0.3;
22
23    sig = [x, y];
24    sig = sig.lace(8);
25
26    offsets = [0, -1, -1, 0, 0, 1, 1, 0] / 3;
27    sig = sig + offsets;
28
29    matr = DC.ar([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]);
30    sig = sig * matr;
31}).play(~testBus0.index, addAction: 'addToHead');
32)
```

-UUU:★--F1 *SCLang:Workspace* All L16 ([New workspace](#)) (SCLang wg yas company Pr

sess1 [?m-g](#) [?0:0](#) [?0: Emacs-x86_64-10*](#) 1:Emacs-x86_64 [?14:42:11](#) [?16-Feb-19](#) [?mmh](#)

File Edit Options Buffers Tools Development YASnippet Help

```
1#version 120
2#extension GL_ARB_texture_rectangle : enable
3
4uniform sampler2DRect           u_tex_unit0;
5uniform float                  u_time;
6
7void main( void )
8{
9    float x = gl_FragCoord.x / 512.0;
10   float y = gl_FragCoord.y / 512.0;
11
12   float sinTime = (sin(u_time)) * 2.0;
13
14   //x = floor(x * 8.0) / 8.5;
15   //y = floor(y * 8.0) / 8.5;
16
17   //float distToC = sqrt(mod(pow(0.5 - y, 2.0), pow(0.5 - y, 2.0
18   sin(mod(sinTime, mod(sinTime, 30.0)))),));
19
20   float distToC = sqrt(pow(0.5 - x, 2.0) / pow(0.5 - y, 2.0));
21
22   float col = (sin(distToC * 15.0 + (u_time * 2.0)) + 1.0) * 0.5;
23   //float col = (sin(x * 30.0 + (u_time * 2.0)) + 1.0) * 0.5;
24   //float col = 0.0;
25
26   gl_FragColor = vec4(col, col, col, 1.0);
27}
```

-UU:----F1 shdr All L19 ([New workspace](#)) (Fundamental wg yas company Pro

sess3 [?m-g](#) [?1:0](#) [?macs-x86](#) 1 10- 1:Emacs-x86_64-10* [?14:42:11](#) [?16-Feb-19](#) [?mmh](#)

430

Abb.: Standbild einer Performance mit kollaborativer dynamischer Wave-Terrain-Synthese
(D. Höpfner und M. Samarotto (2019)).

- Gabor, Dennis (1946), „Theory of Communication“, in: *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 93(26): 429-457.
- Gabor, Dennis (1947), „Acoustical Quanta and the Theory of Hearing“, in: *Nature* 159: 591–594.
- Lindemann, Eric (2007), „Music Synthesis with Reconstructive Phrase Modeling“, in: *IEEE Signal Processing Magazine* 24(2): 80-91.
- Höpfner, D., and M. Samarotto (2019), „A Performance Setup for Collaborative Audio-Visual Live Coding based on a Graphical Approach to Dynamic Wave Terrain Synthesis“, in: *International Computer Music Conference Proceedings*.
- Karplus, K., and A. Strong (1983), "Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres," *Computer Music Journal* 7(2): 43-55.
- Luque, S. (2009), The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis, in: *Leonardo Music Journal* 19: 77-84.
- Manning, Peter (2013), *Electronic and Computer Music*. Oxford: Oxford University Press.
- Meyer, Jürgen (2015), *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, 6. erweiterte Auflage, Bergkirchen: PPV Medien, Edition Bochinsky.
- Müller, Meinard (2015). *Fundamentals of Music Processing: Audio, Analysis, Algorithms, Applications*. Cham u.a.: Springer.
- Roads, Curtis (1996), *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Roads, Curtis (2001), *Microsound*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Roads, Curtis (2015), *Composing Electronic Music. A New Aesthetic*. Oxford: Oxford University Press.
- Ruschkowski, André (2010), *Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen*. Stuttgart: Reclam.
- Schwarz, Diemo (2007), „Corpus-based Concatenative Synthesis“, in: *IEEE Signal Processing Magazine* 24(2): 92-104.
- Smith, J.O. (2010). *Physical Audio Signal Processing*, online book, accessed 2.5.2023.
<http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>
- Smith, J.O. (1992). Physical Modeling Using Digital Waveguides, *Computer Music Journal*, 16(4), pp. 74-91.
- Xenakis, Iannis (1992), *Formalized Music*. Revised Edition. Hillsdale, NY: Pendragon Press.