

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 175 668 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

29.01.2003 Patentblatt 2003/05

(21) Anmeldenummer: **00925212.3**

(22) Anmeldetag: **14.04.2000**

(51) Int Cl.7: **G10H 5/00**, G10H 1/12

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP00/03370

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 00/063877 (26.10.2000 Gazette 2000/43)

(54) **VORRICHTUNG ZUR SIGNALBERECHNUNG UND -ERZEUGUNG, INSBESONDERE ZUR DIGITALEN KLANGSYNTHESE**

DEVICE FOR CALCULATING AND GENERATING SIGNALS, ESPECIALLY FOR DIGITAL SOUND SYNTHESIS

DISPOSITIF DE CALCUL ET DE PRODUCTION D'UN SIGNAL, EN PARTICULIER POUR SYNTHÈSE SONORE NUMÉRIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE**

(30) Priorität: **19.04.1999 DE 19917434**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
30.01.2002 Patentblatt 2002/05

(73) Patentinhaber: **FTMusicS GmbH
91056 Erlangen (DE)**

(72) Erfinder:

- **Rabenstein, Rudolf, Dr.-Ing.habil
91058 Erlangen (DE)**
- **Trautmann, Lutz, Dipl.-Ing.
91058 Erlangen (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:

EP-A- 0 486 925	EP-A- 0 548 626
US-A- 5 149 902	US-A- 5 223 657
US-A- 5 256 830	US-A- 5 777 255

EP 1 175 668 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Signalberechnung und -erzeugung, insbesondere zur digitalen Klangsynthese, durch rechnergestützte Nachbildung von Schwingungsvorgängen bei akustischen Musikinstrumenten oder anderen schwingenden Gebilden. Eine solche Nachbildung wird als physikalische Modellierung bzw. als virtuelle Akustik bezeichnet.

[0002] Zur Einordnung der physikalischen Modellierung in die digitale Klangsynthese werden zunächst allgemein verwendete Verfahren, insbesondere klassische direkte Syntheseverfahren, erörtert.

[0003] Eines der ersten weit verbreiteten Verfahren zur digitalen Klangsynthese arbeitet mit Frequenzmodulation (FM-Synthese) und wurde 1973 von Chowning entwickelt. Bei der FM-Synthese werden mindestens zwei Oszillatoren eingesetzt, wobei der eine (Modulator) den anderen (Träger) steuert. Mit diesem Algorithmus können komplexe Spektren erzeugt werden, die auch Nichtlinearitäten im Zeitbereich aufweisen können. Mit mehreren parallel geschalteten Systemen dieser Art können zwar recht komplexe Klänge erzeugt werden, jedoch ist die authentische Nachbildung von akustischen Musikinstrumenten damit nicht möglich.

[0004] Beim Sampling werden die Schwingungen von real gespielten Musikinstrumenten als Folgen von Abtastwerten gespeichert und auf Abruf abgespielt. Um Speicherplatz zu sparen, werden drei verschiedene Methoden angewendet. Zum einen wird davon ausgegangen, daß sich nach dem Einschwingvorgang an der Schwingungsform nur wenig ändert. Dadurch können wenige Abtastwerte in einer Schleife ausgelesen werden. Die geringfügigen Veränderungen werden in anschließenden Filtern realisiert. Die zweite Methode besteht in der Tonhöhenverschiebung (Transponierung). Um nicht alle Tonhöhen des realen Musikinstrumentes aufnehmen und abspeichern zu müssen, kann der aufgenommene Ton transponiert werden. Zur effizienten Speicherausnutzung kann als dritte Methode die Datenreduktion (Verluste bei der Klangqualität) und die Datenkompression (keine Verluste bei der Klangqualität) herangezogen werden. Der Vorteil beim Sampling liegt in der exakten Nachbildung eines gespielten Klanges. Dadurch kann aber die Variabilität eines echten Instrumentes nicht realisiert werden.

[0005] Bei der Klangsynthese mit Wavetables werden kurze Samples von Musikinstrumenten ineinander übergeblendet, wodurch komplexere und variabelere Klänge als beim einfachen Sampling erreicht werden können.

[0006] Ein Klangsyntheseverfahren im Frequenzbereich stellt eine additive Synthese dar, bei der Sinusschwingungen verschiedener Frequenz und Amplitude in variablen gegenseitigen Phasenlagen aufaddiert werden. Die Schwierigkeit bei dieser Klangsynthese besteht in der Bestimmung der o.g. Parameter. Diese können nur näherungsweise durch geeignete Analyse (Kurzzeit-Fourier-Transformation) des realen Instrumententons erhalten werden. Rauschartige Klänge können bei diesem Verfahren nur mit erheblichem Aufwand erzeugt werden.

[0007] Im Gegensatz zur additiven Synthese werden bei der subtraktiven Synthese Frequenzen einer rauschartigen Quelle durch anschließende Filterung unterdrückt. Dies hat den Vorteil, daß rauschartige Klänge leicht generiert werden können. Monofrequente Töne können aber nur mit hohem Filteraufwand erreicht werden.

[0008] Die Formant-Synthese geht davon aus, daß der Klang eines akustischen Musikinstrumentes bestimmte Frequenzbereiche besitzt, die unabhängig von der gerade gespielten Tonhöhe betont werden. Bei den hierauf basierenden Verfahren werden kurze Wellenformen verwendet, die additiv überlagert und ineinander übergeblendet werden. Alle diese kurzen Wellenformen betonen dabei die Formantfrequenzen.

[0009] Die Gemeinsamkeit aller dieser Syntheseverfahren besteht darin, daß sie vom Klang eines simulierten Instrumentes ausgehen. Bei der physikalischen Modellierung wird demgegenüber nicht mehr vom Klang eines Musikinstrumentes ausgegangen, sondern von dessen konstruktivem Aufbau und von den daraus resultierenden Eigenschaften. Ausgangspunkt sind dabei partielle Differentialgleichungen, deren Lösung die Wellenform und damit den Klang des Instrumentes bestimmt. Der Vorteil der physikalischen Modellierung liegt in der musikalischen Ausdruckskraft, die mit diesem Ansatz erreicht werden kann. Dies kann mit den folgenden Verfahren realisiert werden.

[0010] Bei der numerischen Lösung wird die partielle Differentialgleichung in eine Differenzengleichung mit fester Orts- und Zeitschrittweite umgewandelt. Diese kann im Rechner gelöst werden. Der Nachteil dieser Methode besteht in dem hohen numerischen Aufwand bei ausreichend kleiner Ortsschrittweite. Mit dieser Methode können auch mehrdimensionale Modellgleichungen gelöst werden, wobei der numerische Aufwand aber enorm ansteigt.

[0011] Die Modale Synthese geht davon aus, daß jede komplexe vibrierende Struktur in Unterstrukturen zerlegt werden kann, die durch ihre Moden (Eigenschwingungen) und Dämpfungskonstanten charakterisiert werden können. Eine Kopplung (auch nichtlinear) besteht dabei nur zwischen gleichen Moden, ein Energieaustausch zwischen verschiedenen Moden ist nicht möglich. Bei komplexen Strukturen ist eine Bestimmung der Moden nur experimentell möglich.

[0012] Beim Masse-Feder-Modell von Cadoz u.a. (1983) wird das zu untersuchende schwingende Objekt in einzelne Massepunkte zerlegt, die mit idealen Federn und Dämpfern miteinander verbunden sind. Durch Diskretisierung der physikalisch begründeten Differentialgleichungen erhält man Differenzengleichungen, die im Rechner implementiert werden können. Der Nachteil dieser Methode liegt in der enormen Rechenkapazität auch schon bei einfachen Strukturen.

[0013] Wellenleiter stellen die am weitesten verbreitete Methode zur physikalischen Modellierung von Musikinstrumenten dar. Dies liegt zum einen an der einfachen Realisierung und zum anderen an der geringen benötigten Rechenleistung. Die Wellenleiter-Methode geht von vor- und rücklaufenden Wellen auf einem schwingungsfähigen Gebilde aus, die durch Verzögerungsleitungen dargestellt werden können. Die Verluste sowie Dispersion während der Schwingung werden konzentriert in Übertragungsfunktionen realisiert. Mit dieser Methode können auch Schwingungen mehrdimensionaler Strukturen realisiert werden, dies erfordert aber ein Netz aus Verzögerungsleitungen, die mittels mehrdimensionaler Verbindungen (Scattering Junctions) miteinander kommunizieren.

[0014] Die Nachteile dieser Synthesemethode bestehen in der aufwendigen Filterrealisierung, insbesondere bei geringen Tönhöhenveränderungen, da die Verzögerungsleitung nur um ganze Zahlenwerte verändert werden kann. Die kontinuierlichen Tönhöhenveränderungen müssen in den Übertragungsfunktionen im Rückkopplungszweig realisiert werden. Dadurch sind die verwendeten Übertragungsfunktionen nicht mehr allein physikalisch motiviert, sondern müssen meist experimentell bestimmt werden. Eine derartige Synthesemethode ist beispielsweise aus der US-A-5 256 830 bekannt.

[0015] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Signalerzeugungsvorrichtung zu schaffen, die eine die Schwingungen eines schwingungsfähigen Gebildes nachbildende oder simulierende Signalgenerierung mit verhältnismäßig einfachen Mittel erlaubt.

[0016] Diese Aufgabe wird mit den im Patentanspruch 1 genannten Merkmalen gelöst.

[0017] Weiterhin wird mit der Erfindung ein Verfahren gemäß dem Patentanspruch 8 geschaffen.

[0018] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0019] Die erfindungsgemäße Signalerzeugungsvorrichtung und das erfindungsgemäße Signalerzeugungsverfahren erlauben u.a. eine digitale Klangsynthese und beruhen auf einem exakten Modell der physikalischen Schwingungserzeugung, insbesondere Klangerzeugung. Hieraus wird dann die Struktur eines Systems abgeleitet, das mit digitalen Bauelementen realisiert werden kann. Die entstehende Parallelanordnung digitaler rekursiver Systeme ist mehr als eine Zusammenschaltung digitaler Oszillatoren. Je nach der beschreibenden partiellen Differentialgleichung haben die digitalen rekursiven Systeme den Grad 1, 2 oder Vielfache davon. Jedes einzelne digitale rekursive System bildet damit nicht nur die Frequenz, sondern auch den Verlauf der zeitlichen Einhüllenden jeweils einer Eigenschwingung eines fiktiven oder realen Klangkörpers gemäß dem zugrundeliegenden physikalischen Modell exakt nach. Das Ausgangssignal der Parallelanordnung entspricht damit im gesamten Hörbereich dem Obertonspektrum des physikalischen Modells.

[0020] Vorteilhaft ist auch die Modellierung und digitale Realisierung der Anregung aus den Anfangs- und Randwerten, sowie der Erregungsfunktion der partiellen Differentialgleichung eines schwingungsfähigen Systems.

[0021] Wie bereits vorstehend erwähnt, unterscheiden sich die Verfahren mit physikalischer Modellierung von den übrigen Verfahren durch eine mögliche nuancierte Spielweise der simulierten Instrumente. Diese musikalische Phrasierbarkeit und die einfache Variabilität des Instrumentes und der daraus folgende Klang ist ein großer Vorteil der physikalischen Modellierung. Nachfolgend wird das erfindungsgemäße Verfahren mit einigen anderen Methoden zur Verdeutlichung der erfindungsgemäß erzielbaren Vorteile verglichen.

[0022] Die Finite-Differenzen-Methode diskretisiert eine partielle Differentialgleichung des Modells und löst sie dann. Dies hat den Nachteil, daß durch die Diskretisierung Instabilitäten entstehen können, die bei einem kontinuierlichen Modell und damit bei der hier vorgestellten Methode nicht vorhanden sind. Desweiteren müssen bei der Finiten-Differenzen-Methode alle Auslenkungen der Ortspunkte innerhalb des Abtastrasters zu jedem Zeitpunkt berechnet werden. Dies erfordert eine sehr hohe Rechenleistung, auch schon bei einfachen Strukturen. Bei der hier vorgestellten Methode können dagegen einzelne und beliebige Ortspunkte herausgegriffen und deren Bewegung simuliert werden. Dadurch wird die benötigte Rechenleistung stark begrenzt.

[0023] Bei der erfindungsgemäßen Technik kann die Gesamtschwingung eines Systems aus dessen Teilschwingungen synthetisiert werden. Im Gegensatz zur Modalen Synthese lassen sich hierbei aber auch die Schwingungsformen sehr komplexer Modelle direkt lösen, ohne daß auf eine experimentelle Analyse zurückgegriffen werden müßte. Dadurch sind im Prinzip beliebige Formen und Randbedingungen der schwingungsfähigen Gebilde möglich.

[0024] Die hier vorgestellte Funktionaltransformationmethode erlaubt außerdem eine physikalisch exakte und voneinander getrennte Behandlung von Erregungen, Anfangsbedingungen und Randbedingungen. Dies ist für das Verständnis des Syntheseverfahrens und damit für den Anwender von großer Bedeutung. Vorteilhaft ist dabei ferner, daß zur Erzeugung der Schwingungen digitale Strukturen angegeben werden.

[0025] Gegenüber der Wellenleiter-Methode hat das hier vorgestellte Verfahren den Vorteil, daß die Schwingung (z. B. einer Saite) zu jedem Zeitpunkt z.B. durch Verwendung der Sturm-Liouville-Transformation exakt (abhängig von der Exaktheit der Schwingungsdifferentialgleichung) berechnet wird. Mit der Wellenleiter-Methode kann dagegen die Schwingung nur näherungsweise berechnet werden. Zusätzlich kann bei der hier vorgestellten Methode in einfacher Weise die Abhörposition oder auch die Tonhöhe sowie jede andere physikalische Konstante des Musikinstrumentes geändert werden. Bei der Wellenleiter-Methode müssen dagegen die Übertragungsfunktionen neu berechnet werden.

[0026] Außerdem müssen in dem hier vorgestellten Verfahren lediglich die physikalischen Eigenschaften (Elastizi-

tätsmodul, Maße, Dichte usw.) z.B. der Saite und deren Randbedingungen (Befestigungsarten an beiden Enden) angegeben werden. Dies verspricht eine direkte und leicht verständliche Klangbeeinflussung im Gegensatz zum Stand der Technik.

[0027] Durch den Einsatz des diskreten rekursiven Systems zur Berechnung der Schwingung ist Echtzeitfähigkeit gegeben. Das Verfahren und die Vorrichtung zeichnen sich hierbei auch durch hohe Geschwindigkeit aus.

[0028] Mit der physikalischen Modellierung lassen sich akustische Musikinstrumente wesentlich nuancierter und originalgetreuer nachbilden als durch andere Syntheseformen wie z.B. durch Sampling. Die Erfindung ist damit z.B. bei elektronischen Musikinstrumenten wie Keyboards, Synthesizern, Expandern und Computer-Soundkarten mit Algorithmen zur physikalischen Modellierung vorteilhaft einsetzbar. Auch können in sogenannten Software-Synthesizern die Algorithmen erfindungsgemäß ausgelegt werden, welche die Klangberechnung direkt auf der CPU eines PCs bzw. auf speziellen Soundkarten mit Digitalen Signalprozessoren (DSPs) durchführen.

[0029] Das hier vorgestellte Verfahren simuliert somit Schwingungsvorgänge mit Hilfe einer Darstellung durch mehrdimensionale Modelle, wobei zur Realisierung rekursive Systeme eingesetzt werden. Es unterscheidet sich von den in elektronischen bzw. digitalen Musikinstrumenten bereits implementierten Algorithmen u.a. in der Exaktheit des Ergebnisses und in der direkten Eingabe von verschiedenartigen Schwingungsanregungen. Während bei den z.Z. üblichen Algorithmen zur physikalischen Modellierung aufgrund deren inneren Strukturen die hörbaren Schwingungen von Saiten oder Luftsäulen nur angenähert werden können, vermag das hier vorgestellte Verfahren diese Schwingungen exakt zu reproduzieren. Trotz dieser Exaktheit ist die Echtzeitfähigkeit des vorgestellten Verfahrens gegeben.

[0030] Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher beschrieben.

Fig. 1 zeigt ein schematisches, vereinfachtes Modell einer schwingenden Saite,

Fig. 2 zeigt eine Ein-Ausgangs-Beschreibung durch Übertragungsfunktionen,

Fig. 3 zeigt ein digitales System zur Nachbildung des Systems gemäß Fig. 2,

Fig. 4 zeigt die Struktur eines der für Erregung, Anfangs- oder Randwerte vorgesehenen digitalen Systeme gemäß Fig. 3,

Fig. 5 zeigt die Struktur eines in Fig. 4 gezeigten digitalen Systems, und

Fig. 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Gesamtsystems eines Ausführungsbeispiels zur digitalen Klangsynthese.

[0031] Ausgangspunkt der nachfolgenden Erläuterung ist ein physikalisches Modell in Gestalt einer partiellen Differentialgleichung. Es entsteht aus der Beschreibung des Verhaltens von Saiten, Luftsäulen oder anderen schwingungsfähigen Gebilden durch die Grundgleichungen der Akustik oder der Elastizitätstheorie. Je nach dem Detaillierungsgrad dieser physikalischen Modelle erhält man unterschiedliche partielle Differentialgleichungen, z.B. für Luftschwingungen; Longitudinalwellen einer Saite; oder Transversalwellen einer Saite mit oder ohne Berücksichtigung von Rotation und Scherung.

[0032] Fig. 1 zeigt ein vereinfachtes Modell einer schwingenden Saite. Mögliche Vereinfachungen sind z.B. die Vernachlässigung der Dicke gegenüber der Länge der Saite, die Annahme einer vollkommen starren Auflage an den Enden, die Vernachlässigung von Rotation und Scherung, etc. Unter diesen Bedingungen werden Transversalschwingungen dieser Saite durch folgende Differentialgleichungen beschrieben:

$$c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} y(x, t) = \frac{\partial^4}{\partial x^4} y(x, t) + \text{Erregung}$$

und Anfangsbedingungen

und Randbedingungen (1)

[0033] Der Koeffizient c enthält physikalische Kenngrößen des Saitenmaterials. Die Art der gemachten Annahmen bestimmt Anzahl und Ordnung der partiellen Ableitungen und die Koeffizienten der Differentialgleichung. Ein hier nicht näher angegebener Erregungsterm beschreibt die Anregung der Schwingung, z.B. durch einen gestrichenen Bogen. Die Anfangsbedingungen beschreiben den Zustand der Saite bei Beginn der Schwingung, z.B. durch Anschlagen oder Zupfen der Saite. Die Randbedingungen geben an, wie die Befestigung der Saite am Rand ihr Schwingungsverhalten

beeinflusst.

[0034] Für die Umsetzung von partiellen Differentialgleichungen in zeit- und ortsdiskrete Simulationsmodelle, die mit einem Digitalrechner oder mit Bauelementen der Digitaltechnik realisiert werden können, gibt es verschiedene Verfahren. Dazu zählen Finite-Differenzen- und Finite-Elemente-Methoden der numerischen Mathematik, die jedoch die

[0035] Bei einer bevorzugten Methode wird aus der Beschreibung von Schwingungen durch partielle Differentialgleichungen ein anderes gleichwertiges Modell in Gestalt einer mehrdimensionalen Übertragungsfunktion gewonnen. Das mathematische Werkzeug dazu sind geeignete Funktionaltransformationen für die Zeit- und die Ortskoordinate. Sie wandeln nicht nur die partielle Differentialgleichung in eine algebraische Gleichung um, sondern erlauben auch eine exakte Berücksichtigung der Anfangs- und Randbedingungen. Dieses Verfahren wird Funktionaltransformationemethode genannt. Die Handhabung dieser mathematischen Methode wird im nächsten Abschnitt skizziert.

[0036] Die Darstellung des Verhaltens von elektronischen Netzwerken - beschrieben durch gewöhnliche Differentialgleichungen - durch Übertragungsfunktionen ist seit langem Stand der Technik. Durch Anwendung der Laplace-Transformation auf eine gewöhnliche Differentialgleichung und die zugehörigen Anfangsbedingungen entsteht eine algebraische Gleichung, die die Anfangswerte als additive Terme enthält. Durch Auflösen der algebraischen Gleichung nach der Laplace-Transformierten des Ausgangssignals entsteht ein Ein-Ausgangsmodell in Gestalt einer Übertragungsfunktion. Dieses Vorgehen wird hier auf die vorliegende partielle Differentialgleichung übertragen. Zunächst wird auf die Transformation für die Zeitvariable eingegangen.

[0037] Durch die Anwendung der Laplace-Transformation:

$$y(x,t) \rightarrow L \{y(x,t)\} = Y(x,s) \quad (2)$$

auf das Anfangs-Randwertproblem (1) entsteht zunächst eine Randwertaufgabe für die Laplace-Transformierte $Y(x,s)$ der gesuchten Lösung $y(x,t)$.

$$c^2 s^2 Y(x,s) = \frac{\partial^4}{\partial x^4} Y(x,s) + \text{Erregung} + \text{Anfangswerte}$$

$$\text{und} \quad \text{Randbedingungen} \quad (3)$$

[0038] Aus der zweiten Ableitung von $y(x,t)$ in (1) wird hier eine Multiplikation mit der zweiten Potenz der komplexen Frequenzvariable s . Außerdem treten die Anfangsbedingungen aus (1) als additiver Term in (3) auf, der die gegebenen Anfangswerte enthält.

[0039] Es wird nun eine geeignete Transformation für die Ortsvariable durchgeführt, die die Randbedingungen in der gleichen Weise in einen additiven Term umwandelt, wie die Laplace-Transformation dies mit den Anfangsbedingungen getan hat. Eine solche Transformation ist die Sturm-Liouville-Transformation:

$$Y(x,s) \rightarrow T \{Y(x,s)\} = \bar{Y}(\beta_\mu, s). \quad (4)$$

[0040] Die örtliche Frequenzvariable β_μ nimmt diskrete Werte an und entspricht den Eigenfrequenzen des Systems. Die genaue Definition der örtlichen Transformation T hängt von der Form der partiellen Differentialgleichung ab. In dem einfachen Fall von (1) lautet sie

$$T \{Y(x,s)\} = \bar{Y}(\beta_\mu, s) = \int_{x_0}^{x_1} Y(x,s) K(\beta_\mu, s) dx \quad (5)$$

[0041] Hier sind x_0 und x_1 die Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Saite. Der Transformationskern $K(\beta_\mu, x)$ hängt ebenfalls von der partiellen Differentialgleichung (1) ab und beschreibt die Form der Eigenschwingungen. Im hier vorliegenden Fall sind sie sinusförmig, bei komplizierteren Schwingungsproblemen können sie andere Formen annehmen.

[0042] Die Eigenfrequenzen nehmen nur diskrete Werte an; im einfachsten Fall sind sie Vielfache der Grundschiwingung. Die Rücktransformation besteht daher aus einer Summe über die vorkommenden Eigenschwingungen:

$$\mathbf{T}^{-1}\{\bar{Y}(\beta_\mu, s)\} = Y(x, s) = \sum_\mu \frac{1}{N_\mu} \bar{Y}(\beta_\mu, s) K(\beta_\mu, x) \quad (6)$$

N_μ ist ein Normierungsfaktor. Wenn der Transformationskern $K(\beta_\mu, x)$ eine sinoder cos-Funktion ist, entspricht die Rücktransformation $\mathbf{T}^{-1}$ einer Entwicklung von $Y(x, s)$ in eine Fourier-Reihe mit den Koeffizienten $\bar{Y}(\beta_\mu, s)$. Die Hintransformation $\mathbf{T}$ entspricht dann der Formel zur Berechnung der Fourier-Koeffizienten.

[0043] Durch inverse Laplace-Transformation erhält man aus (6) die Lösung der Gleichung (1):

$$\mathbf{T}^{-1}\{\bar{Y}(\beta_\mu, t)\} = y(x, t) = \sum_\mu \frac{1}{N_\mu} \bar{y}(\beta_\mu, t) K(\beta_\mu, x) \quad (7)$$

mit

$$\bar{y}(\beta_\mu, t) = \mathbf{L}^{-1}\{\bar{Y}(\beta_\mu, s)\}. \quad (8)$$

[0044] Diese Form der Lösung ist aber für die praktische Berechnung noch nicht optimal, da die Zeitverläufe der spektralen Komponenten $\bar{y}(\beta_\mu, t)$ bekannt sein müssen. Um sie zu erhalten, ist eine Ein-Ausgangs-Beschreibung der Gleichung (1) erforderlich, was im folgenden diskutiert wird.

[0045] Bei richtiger Wahl der Eigenfrequenzen β_μ und der Eigenfunktionen $K(\beta_\mu, x)$ führt die Anwendung der Transformation $\mathbf{T}$ auf das Randwertproblem (3) zu einer algebraischen Gleichung:

$$c^2 s^2 \bar{Y}(\beta_\mu, s) + \beta_\mu^4 \bar{Y}(\beta_\mu, s) = \text{Erregung} + \text{Anfangswerte} + \text{Randwerte}. \quad (9)$$

[0046] Sie kann nach der Transformierten $\bar{Y}(\beta_\mu, s)$ der gesuchten Lösung $y(x, t)$ aufgelöst werden. Dadurch entsteht eine Ein-Ausgangs-Beschreibung mit der Erregungsfunktion, den Anfangswerten und den Randwerten als Eingängen und der gesuchten Lösung als Ausgang. Die Beziehungen zwischen den Eingängen und dem Ausgang werden durch Übertragungsfunktionen beschrieben, die die Konstante c aus (1), die komplexe Frequenzvariable s bezüglich der Zeit t und die diskrete Frequenzvariable β_μ bezüglich des Ortes x enthalten. Im einfachsten Fall lautet eine solche Übertragungsfunktion:

$$\bar{G}(\beta_\mu, s) = \frac{1}{c^2 s^2 + \beta_\mu^4} \quad (10)$$

[0047] Abhängig von der Art der Erregung, den Anfangs- oder Randbedingungen kann auch der Zähler ein Polynom in s und β_μ sein.

[0048] Fig. 2 zeigt diese Ein-Ausgangs-Beschreibung in Form eines Blockdiagramms. Die Systeme 1 bis 3 (System 1 (S_E) für die Erregung, System 2 (S_A) für die Anfangswerte, und System 3 (S_R) für die Randwerte) werden jeweils durch Übertragungsfunktionen nach (10) beschrieben. Ihre Ausgangssignale werden über einen Addierer 4 zur Bildung des Ausgangssignals $y(x, t)$ zusammengefaßt.

[0049] Die hier dargestellte mathematische Beschreibung eines schwingungsfähigen Systems durch Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen (bzw. Eigenwerte und Eigenfunktionen) ist die Grundlage für die Konstruktion eines hier offenbarten digitalen Systems zur Schwingungssynthese, insbesondere Klangsynthese. Die Konstruktionsprinzipien werden im nächsten Abschnitt erläutert.

[0050] Nachstehend wird die Überführung des mathematischen Modells gemäß Fig. 2 in ein digitales System beschrieben. Der Zweck dieses digitalen Systems ist die Generierung von Klängen nach einem physikalischen Vorbild. Dabei sollen die Zeitverläufe der Schwingungsamplitude (Auslenkung, Schalldruck) an einem oder mehreren gewünschten Ortspunkten reproduziert werden. Das bedeutet, daß das Ausgangssignal des digitalen Systems der Ausgangsgröße $y(x, t)$ aus Fig. 2 an den diskreten Zeitpunkten $t=kT$ und den diskreten Ortspunkten $x=x_n$ möglichst exakt

entspricht. Die diskreten Zeitpunkte sind ganzzahlige Vielfache des Abtastintervalls T , das entsprechend dem Abtasttheorem zu wählen ist. Die diskreten Ortspunkte können nach Zahl und Lage beliebig gewählt werden.

[0051] Ausgangspunkt für die Konstruktion des digitalen Systems ist die Darstellung durch Übertragungsfunktionen nach Fig. 2. Jede Übertragungsfunktion nach (10) läßt sich für einen festen Wert von μ als Beschreibung eines ortsunabhängigen kontinuierlichen Systems zweiter Ordnung auffassen. Für die Überführung kontinuierlicher Systeme in diskrete Systeme existieren bekannte Transformationen, wie die impuls- oder sprunginvariante Transformation oder die bilineare Transformation. Wenn solche Transformationen auf jede der Übertragungsfunktionen nach (10) und für jeden Wert von μ angewandt werden, entsteht aus dem zeitund ortskontinuierlichen System nach Fig. 2 ein zeitdiskretes System, dessen Reaktion den Ausgang von Fig. 2 für die Zeitpunkte $t=kT$ nachbildet. Wird zusätzlich die Rücktransformation nach (6) an diskreten Ortspunkten $x=x_n$ ausgewertet, so entsteht ein zeit- und ortsdiskretes System nach Fig. 3 mit dem gleichen prinzipiellen Aufbau wie in Fig. 2.

[0052] Fig. 3 zeigt ein digitales System zur Nachbildung des Systems aus Fig. 2, wobei nun digitale Teilsysteme D_E , D_A , D_R (Systeme 5 bis 7) anstelle der kontinuierlichen Systeme 1 bis 3 mit den Übertragungsfunktionen S_E , S_A , S_R vorgesehen sind. Die Ausgangssignale der Systeme 5 bis 7 werden auch hier wie bei Fig. 2 über einen Addierer 8 zu einem Ausgangssignal $y(x_n, kT)$ zusammengefaßt. Die Struktur der in Fig. 3 gezeigten einzelnen Teilsysteme 5 bis 7 (D_E , D_A , D_R) ist jeweils gleich und in Fig. 4 für eines der Teilsysteme dargestellt. An den Eingängen Eingang 1 bis Eingang m liegen jeweils die Komponenten von Erregung, Anfangswerten bzw. Randwerten für die Eigenfrequenzen μ an. Bei nichtlinearen Modellen treten außerdem Kopplungen zwischen den einzelnen rekursiven Systemen 9, 11 und 12 auf.

[0053] Fig. 4 zeigt die Struktur eines der digitalen Systeme D_E , D_A , D_R (eines der Systeme 5 bis 7) aus Fig. 3 für Erregung, Anfangs- oder Randwerte. Der Aufbau ist für alle Systeme 5 bis 7 grundsätzlich gleich. Mit jedem Eingang 1 bis m ist jeweils eine Reihenschaltung aus einem System 9, 11 bzw. 13 (System R_1 , R_2 , bzw. R_m) und einem Verstärker oder Multiplikator 10, 12 bzw. 14 verbunden, der das Ausgangssignal des zugehörigen Systems 9, 11 bzw. 13 mit einem Faktor $K_\mu(x_n)$ (mit $\mu = 1$ bis m) multipliziert. Die Ausgangssignale der Multiplikatoren 10, 12, 14 ... werden über einen Addierer 15 addiert, der das Ausgangssignal $y(x_n, kT)$ erzeugt. Die Systeme R_1 bis R_m entstehen aus den Übertragungsfunktionen (10) durch die genannten Transformationen (impuls-, sprunginvariant, bilinear). Sie werden durch Differenzengleichungen beschrieben, die die gleiche Ordnung wie die Übertragungsfunktion (10) im zeitlichen Frequenzbereich oder ein Vielfaches davon besitzen. Eine vorteilhafte Realisierung dieser Systeme 10, 12 bzw. 14 ist in Fig. 5 gezeigt, die die Struktur eines dieser digitalen Systeme veranschaulicht. Alle Systeme sind vorzugsweise identisch so, wie in Fig. 5 gezeigt, aufgebaut.

[0054] Jedes System ist hierbei als rekursives Digitalfilter (IIR-Filter mit unendlicher Impulsantwort) ausgebildet, dessen am Eingang 20 anliegendes Eingangssignal über mehrere, hier drei Zweige 21, 22 und 23 mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren b_0 , b_1 , b_2 bewertet und an Addierer 24, 27, 30 angelegt wird. Das vom Addierer 30 abgegebene Ausgangssignal $y_\mu(k)$ bildet das Ausgangssignal des gesamten Systems 9, 11 oder 13 und wird über Zweige 25, 28 auf die Addierer 24 und 27 unter Bewertung mit abschwächenden Gewichtungsfaktoren $-c_0$, $-c_1$ rückgekoppelt. Das Ausgangssignal des Addierers 24 wird über ein Zeitverzögerungsglied 26 an einen dritten Eingang des Addierers 27 angelegt, dessen Ausgangssignal seinerseits über ein Zeitverzögerungsglied 29 zu einem zweiten Eingang des ausgangsseitigen Addierers 30 gespeist wird. Die Gewichtungsfaktoren b_0 , b_1 , b_2 berechnen sich aus den physikalischen Größen des Schwingungsmodells. Gleiches gilt auch für die Gewichtungsfaktoren $-c_0$ und $-c_1$. Die Zeitkonstanten T der Zeitverzögerungsglieder 26 und 29 werden aus der Abtastfrequenz bestimmt.

[0055] Die Ausgangssignale $y_\mu(k)$, (mit $\mu=1, \dots, m$) der Addierer 30 der einzelnen Systeme 9, 11, 13 entsprechen im Rahmen der diskreten Approximation den Komponenten $\tilde{y}(\beta_\mu, t)$ aus Gleichung (8), abgetastet an den Zeitpunkten $t=kT$. Diese Signale beschreiben die Zeitverläufe der einzelnen Eigenschwingungen. Daraus folgt durch die Rücktransformation T^{-1} nach Gleichung (7) der Zeitverlauf des gesamten Ausgangssignals.

[0056] Der Summationspunkt 15 in Fig. 4 entspricht der Summe in (7).

[0057] Die Faktoren $K_\mu(x_n)$ der Multiplizierer 10, 12, 14 (Fig. 4) sind aus den Eigenfunktionen $K(\beta_\mu, x_n)$ an diskreten Ortspunkten x_n und den Normierungsfaktoren N_μ in (7) gebildet:

$$K_\mu(x_n) = \frac{1}{N_\mu} K(\beta_\mu, x_n) \quad (11)$$

[0058] Da für die Klangsynthese nur das Schwingungsverhalten innerhalb des Hörbereichs von Interesse ist, muß die Summation nur diejenigen Eigenfrequenzen erfassen, die im Hörbereich, d.h. z.B. zwischen 16 Hz und 16 kHz liegen (hier mit $\mu=1, \dots, m$ bezeichnet). Das Ausgangssignal $y_l(x_n, kT)$ stellt damit eine diskrete Approximation des hörbaren Schwingungsverhaltens dar. Dabei steht $l=E, A, R$ jeweils für das Resultat aufgrund der Erregung, der Anfangs- und der Randwerte. Alle drei Systeme 5, 6, 7, die jeweils die Struktur gemäß Fig. 4 aufweisen, bilden zusammen das Ausgangssignal des digitalen Systems nach Fig. 3.

[0059] Den prinzipiellen Aufbau des Gesamtsystems zur digitalen Klangsynthese zeigt Fig. 6. Das physikalische Modell 33 und seine Parameter 34 sind einem akustischen Vorbild entnommen und dienen lediglich dazu, die Ausle-
gungsparameter des Gesamtsystems zu definieren, stellen als solche aber keinen Bestandteil des Gesamtsystems
dar. Dabei spielt es keine Rolle, ob dieses akustische Vorbild mit technischen Mitteln und vertretbarem Aufwand rea-
lisiert werden kann oder nicht. Wichtig ist nur, daß es ein schwingungsfähiges System darstellt, das durch bekannte
physikalische Gesetze beschrieben wird. Die mathematische Beschreibung des akustischen Vorbilds steht als physi-
kalisches Modell mit seinen Parametern für die Klangsynthese zur Verfügung.

[0060] Das in Fig. 6 unterhalb der gestrichelten Trennlinie gezeigte System besteht aus den Komponenten: eine
Parallelanordnung 38 digitaler rekursiver Systeme; ein Rechenwerk 35; ein Koeffizientenspeicher 36; eine Anregungs-
einrichtung 37; und ein Steuerwerk (Steuereinrichtung) 39.

[0061] Die Parallelanordnung 38 digitaler rekursiver Systeme besteht aus den digitalen Systemen 5, 6, 7 (Systeme
 D_E , D_A , D_R) aus Fig. 3 mit der in den Fig. 4 und 5 gezeigten Struktur.

[0062] Die einzelnen rekursiven Systeme bestehen aus Addierern, Multiplizierern und Speicherelementen (Zeitver-
zögerungsgliedern), wie dies in Fig. 5 anhand eines Beispiels gezeigt ist. Die Anzahl der Speicherelemente ist gleich
der Anzahl der zeitlichen Ableitungen in der zugrundeliegenden partiellen Differentialgleichung oder ein Vielfaches
davon.

[0063] Dabei wird jede Eigenschwingung (Harmonische) des physikalischen Systems durch ein digitales rekursives
System realisiert. Deren parallele Anordnung bildet dann das Obertonspektrum nach. Kopplungen dieser parallelen
Systeme treten bei nichtlinearen Modellen auf. Die Anzahl der parallelgeschalteten rekursiven Systeme kann dabei
vorzugsweise auf die Anzahl der Obertöne innerhalb des Hörbereichs begrenzt werden, ohne daß eine Beeinträchti-
gung des Höreindrucks entsteht.

[0064] Die gekoppelte Parallelanordnung 38 digitaler rekursiver Systeme ist grundsätzlich zur Nachbildung aller
Schwingungsvorgänge geeignet, die durch die entsprechende partielle Differentialgleichung (auch nichtlinear) be-
schrieben werden. Die Synthese eines bestimmten Klangs erfordert die Festlegung der Koeffizienten der einzelnen
digitalen Systeme. Sie werden im Rechenwerk 35 aus den Parametern des physikalischen Modells berechnet. Diese
Parameter sind die physikalischen Konstanten, die den Schwingungsvorgang charakterisieren. Die Berechnungsvor-
schriften ergeben sich aus der Nachbildung der Übertragungsfunktion durch eine digitale Realisierung. Die Herleitung
der Koeffizienten der rekursiven Systeme aus einer Übertragungsfunktion stellt dabei sicher, daß die Eigenfrequenzen
und das zeitliche Abklingverhalten des physikalischen Systems und der digitalen Realisierung exakt übereinstimmen.

[0065] Der Koeffizientenspeicher 36 nimmt einen oder mehrere Koeffizientensätze aus dem Rechenwerk 35 entge-
gen und lädt sie auf Anforderung durch die Steuereinrichtung 39 in die Parallelanordnung 38 digitaler rekursiver Sy-
steme.

[0066] Um die Parallelanordnung 38 digitaler rekursiver Systeme zur Synthese eines Ausgangssignals zu veranlas-
sen, ist die Anregung durch ein oder mehrere Eingangssignale erforderlich. Auch diese Eingangssignale werden dem
physikalischen Modell entsprechend nachgebildet und in der Anregungseinrichtung gespeichert. Die Anregung wird
aus der partiellen Differentialgleichung des schwingungsfähigen Systems abgeleitet und berücksichtigt die Anfangs-
werte (z.B. angeschlagene oder gezupfte Saite), die Randwerte (z.B. Seilschwingungen) und die Erregungsfunktion
(z.B. Resonanzen).

[0067] Die Steuereinrichtung 39 (Steuerwerk) übernimmt die Ablaufsteuerung von Rechenwerk 35, Koeffizienten-
speicher 36, Parallelanordnung 38 und Anregungseinrichtung 37. Diese Möglichkeiten können nicht nur genutzt wer-
den, um die Schwingungen realer Musikinstrumente oder anderer Klangkörper nachzubilden, sondern auch um Klänge
zu synthetisieren, deren natürliche Erzeugung aus technischen Gründen nicht möglich ist.

[0068] Das am Ausgang 40 der Parallelanordnung 38 abgegebene Ausgangssignal stellt das zu erzeugende, ge-
wünschte Signal dar und kann in geeigneter Weise weiter verwendet oder bearbeitet werden. Beispielsweise kann zur
akustischen Hörbarmachung von erzeugten Klangsignalen ein D/A-Wandler an den Ausgang 40 angeschlossen wer-
den und dessen analoges Ausgangssignal ggfls. nach Verstärkung durch einen Verstärker an einen Lautsprecher
angelegt werden.

[0069] Nachfolgend werden einige Erweiterungen und Variationen des vorstehend grundlegend beschriebenen di-
gitalen Systems zur Klangsynthese sowie deren Auswirkungen erläutert.

[0070] Anstelle der in Fig. 5 gezeigten Struktur der rekursiven Systeme kann auch verwendet werden:

- eine andere Struktur eines rekursiven Systems mit gleichem Ein-Ausgangsverhalten, z.B. Regelungsnormalform,
Steuerungsnormalform, Zustandsraumstruktur, Leiter (Lattice)-Struktur, Wellendigitalfilter-Struktur;
- eine andere Struktur eines rekursiven Systems, die das Ein-Ausgangsverhalten des Systems aus Fig. 5 approxi-
miert;
- ein nichtrekursives System, das das Ein-Ausgangsverhalten des Systems aus Fig. 5 approximiert.

[0071] Die evtl. gekoppelte Parallelanordnung rekursiver Systeme gemäß Fig. 4 und Fig. 3 stellt eine spezielle Rea-

lisierung eines Systems mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen (MIMO --- multiple input, multiple output) dar. Anstelle dieser Parallelanordnung kann auch verwendet werden:

eine andere Struktur eines MIMO-Systems mit gleichem Ein-Ausgangsverhalten,
eine andere Struktur eines MIMO-Systems, die das Ein-Ausgangsverhalten des Systems aus Fig. 3 und Fig. 4 approximiert.

[0072] Es ist auch eine Parallel- oder Kaskadenanordnung mehrerer Systeme nach Fig. 6 möglich, wobei das Ausgangssignal eines Systems als Anregung für das nachgeschaltete System dient. Zusätzlich zu einer Parallel- oder Kaskadenschaltung mehrerer Systeme zur digitalen Klangsintese nach Fig. 6 sind auch Kombinationen davon möglich.

[0073] Das System nach Fig. 3 kann das Schwingungsverhalten an ausgewählten Ortspunkten x_n nachbilden. Diese Ortspunkte können zur Verbesserung der Schallfeldrekonstruktion auch so gewählt werden, dass das gesamte, vom schwingungsfähigen Körper ausgehende Schallfeld anhand der Syntheseergebnisse an den Punkten x_n exakt oder näherungsweise approximiert werden kann.

[0074] Anstelle der Differentialgleichung (1) für eine Ortskoordinate (x) kann auch eine entsprechende Differentialgleichung für zwei oder drei Ortskoordinaten als physikalisches Modell verwendet werden, so daß mehrere Ortsdimensionen nachbildbar sind. Die Ortsfunktionen $K_\mu(x_n)$ in Fig. 4 sind dann ebenfalls von zwei oder drei Ortsdimensionen abhängig.

[0075] Die vorstehend beschriebene Anordnung zur Klangsintese anhand eines physikalischen Modells kann auch zur Synthese allgemeiner Schwingungen, d.h. zur Nachbildung von anderen physikalischen Schwingungsvorgängen dienen, wenn diese durch partielle Differentialgleichungen beschrieben werden können. Sie stellt dann eine digitale Realisierung zur Nachbildung von allgemeinen schwingungsfähigen Körpern, Fluiden und Energiefeldern dar.

[0076] Die vorstehend beschriebene Anordnung kann auch zur gleichzeitigen Synthese von Potential- und Flußgröße dienen. Dazu ist dann nicht von einer skalaren Differentialgleichung, sondern von einer Vektordifferentialgleichung für Potential- und Flußgröße auszugehen.

[0077] Das hier vorgestellte Verfahren läßt sich z.B. in der Programmiersprache JAVA zur Implementierung für eine schwingende Instrumentensaite realisieren, die auch die Rotationsträgheit und Scherung der Saite berücksichtigen kann. Dies wurde von den Erfindern erfolgreich durchgeführt. In diesem Programm können alle physikalischen Parameter der realen Saite eingegeben werden, was eine Simulation ihres Schwingungsverhaltens einfach ermöglicht.

[0078] Je nach Programmstruktur lassen sich auch die Nichtlinearitäten, die bei der Anregung einer Saite auftreten, berücksichtigen, und Echtzeitfähigkeit erreichen.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Signalberechnung und -erzeugung, insbesondere zur digitalen Klangsintese, mit
einem Rechenwerk (35) zur Berechnung von Koeffizienten in Abhängigkeit von einem physikalischen Modell (33) eines schwingungsfähigen Systems, wobei die Struktur des physikalischen Modells (33) in Form von partiellen Differentialgleichungen vorliegt, und in Abhängigkeit von Parametern (34) des physikalischen Modells (33),
einem Koeffizientenspeicher (36) zur Speicherung der errechneten Koeffizienten,
einer mit dem Koeffizientenspeicher (36) verbundenen Anordnung (38) mehrerer paralleler rekursiver Systeme (9, 11, 13), welche jeweils Eigenschwingungen des physikalischen Modells nachbilden und deren Ausgangssignale die Zeitverläufe der einzelnen Eigenschwingungen beschreiben, wobei diese Ausgangssignale gewichtet aufsummiert werden und das durch die gewichtete Aufsummierung erhaltene Signal das am Ausgang (40) der Anordnung (38) abgegebene, zu erzeugende Signal bildet, wobei die rekursiven Systeme mehrere Addierer (24, 27, 30), zwischen denen Zeitverzögerungsglieder (26, 29) angeordnet sind, deren Verzögerungs-Zeitkonstante (T) aus der Abtastfrequenz bestimmt ist, und Rückkopplungsschleifen (25, 28) enthalten, die an die Addierer (24, 27, 30) angeschlossen sind,
einer mit der Anordnung (38) verbundenen Anregungseinrichtung (37), die Erregungssignale an die Anordnung (38) anlegt, und
einer Steuereinrichtung (39) zur Steuerung des Koeffizientenspeichers (36), der Anregungseinrichtung (37) und der Anordnung (38), derart, daß die Anordnung (38) mit den berechneten und gespeicherten Koeffizienten und den Erregungssignalen betrieben wird.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** die rekursiven Systeme miteinander gekoppelt sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** die rekursiven Systeme zur Verarbeitung von

kontinuierlichen Erregungswerten, Anfangswerten und Randwerten des zugrundeliegenden Modells in Form von partiellen Differentialgleichungen ausgelegt sind.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Rechenwerk (35) die Koeffizienten aufgrund der Übertragungsfunktionen eines Schwingungsvorgänge ausführenden, hinsichtlich seines Schwingungsverhaltens nachgebildeten physikalischen Modells ermittelt.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, daß** an das Rechenwerk (35) als Eingangsgrößen physikalische Parameter angelegt werden, die die physikalischen, einen Schwingungsvorgang eines zugrundegelegten physikalischen Modells charakterisierenden Konstanten darstellen, und das Rechenwerk hieraus die Koeffizienten berechnet.
6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, daß** im Koeffizientenspeicher (36) als Koeffizienten Multipliziererwerte für die rekursiven Systeme (9, 11, 13) gespeichert sind.
7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Anregungseinrichtung (37) mindestens eine Signalquelle zur Anregung der Anordnung (38) enthält.
8. Verfahren zur Signalberechnung und -erzeugung, insbesondere zur digitalen Klangsynthese, mit den Schritten:

Berechnen von Koeffizienten in einem Rechenwerk (35) in Abhängigkeit von einem physikalischen Modell (33) eines schwingungsfähigen Systems, wobei die Struktur des physikalischen Modells (33) in Form von partiellen Differentialgleichungen vorliegt, und in Abhängigkeit von Parametern (34) des physikalischen Modells (33),

Speichern der errechneten Koeffizienten in einem Koeffizientenspeicher (36),

Nachbilden von Eigenschwingungen des physikalischen Modells in einer mit dem Koeffizientenspeicher (36) verbundenen Anordnung (38) mehrerer paralleler rekursiver Systeme (9, 11, 13), deren Ausgangssignale die Zeitverläufe der einzelnen Eigenschwingungen beschreiben, wobei diese Ausgangssignale gewichtet aufsummiert werden und das durch die gewichtete Aufsummierung erhaltene Signal das am Ausgang (40) der Anordnung (38) abgegebene, zu erzeugende Signal bildet, wobei die rekursiven Systeme mehrere Addierer (24, 27, 30), zwischen denen Zeitverzögerungsglieder (26, 29) angeordnet sind, deren Verzögerungs-Zeitkonstante (T) aus der Abtastfrequenz bestimmt ist, und Rückkopplungsschleifen (25, 28) enthalten, die an die Addierer (24, 27, 30) angeschlossen sind,

Anlegen von Erregungssignalen an die Anordnung (38) durch eine mit der Anordnung (38) verbundene Anregungseinrichtung (37), und

Steuern des Koeffizientenspeichers (36), der Anregungseinrichtung (37) und der Anordnung (38), derart, daß die Anordnung (38) mit den berechneten und gespeicherten Koeffizienten und den Erregungssignalen betrieben wird.

Claims

1. Apparatus for the calculation and the generation signals, particularly for digital sound synthesis with
 - a arithmetic unit (35) for the calculation of coefficients depending on a physical model (33) of a vibratory system, where the structure of the physical model (33) is available in form of partial differential equations, and in dependence of the parameters (34) of the physical model (33),
 - a coefficient memory (36) for the storage of the calculated coefficients,
 - an arrangement (38) of multiple parallel digital recursive systems (9,11,13) reproducing the eigenvibrations of the physical model, connected to the coefficient memory (36), whose output signals result with a weighted summation in the desired signal at the output (40) of the arrangement (38), whereby the recursive systems contain multiple adders (24, 27, 30) among which the time delay elements (26,29), whose delay time constant (T) can be obtained from the sampling frequency, and feedback loops (25, 28), connected to the adders (24,27,30),
 - an excitation unit (37) connected with the arrangement (38), applying excitation signals to the arrangement (38) and
 - a controller unit (39) for controlling the coefficient memory (36), the excitation unit (37) and the arrangement (38), such that the arrangement (38) is operated with the calculated and stored coefficients and the excitation signals.

2. Apparatus according to claim 1, **characterized by** the coupling of the digital recursive systems.
3. Apparatus according to claim 1 or 2, **characterized by** the design of the parallel recursive systems for processing continuous excitation functions, initial values and boundary values of the underlying model in form of PDEs.
4. Apparatus according to one of the previous claims, characterized such that the arithmetic unit (35) determines the coefficients from a transfer function model emulating the vibrational behaviour of a vibrational physical model.
5. Apparatus according to one of the previous claims, **characterized by** applying physical parameters, representing the physical constants of a vibrational process of a physical model, as inputs to the arithmetic unit (35), and from which the arithmetic unit (35) is calculating the coefficients.
6. Apparatus according to one of the previous claims, **characterized by** the coefficient memory (36) storing multiplier values for the digital arrangements (9,11,13) as coefficients.
7. Apparatus according to one of the previous claims, **characterized by** the excitation unit (37) containing at least one signal source for the excitation of the arrangement (38).

8. Method for the calculation and for the generation of signals, particularly for digital sound synthesis with the steps:

Calculation of coefficients in a arithmetic unit (35) in dependency of a physical model (33) of a vibratory system, whereby the structure of the physical model (33) is given in form of PDEs and in dependency of parameters (34) of the physical model (33),

storage of the calculated coefficients in a coefficient memory (36),

emulation of eigenvibrations of the physical model in a arrangement (38) of multiple parallel recursive systems (9,11,13), whose output signals describe the temporal envelopes of the single eigenvibrations, connected to the coefficient memory (36), whereby the weighted output signals are summed up and the signal obtained after the weighted summation, forming the desired signal at the output (40) of the arrangement (38), whereby the recursive systems are arranged with multiple adders (24,27,30) between the time delay units (26,29), whose time delay constant (T) is obtained from the sampling frequency, and which are containing feedback loops (25,28), that are connected to the adders (24,27,30),

application of excitation signals to the arrangement (38) using an excitation unit (37) connected to the arrangement (38), and

control of the coefficient memory (36), of the excitation unit (37) and the arrangement (38), such that the arrangement (38) is operated with the calculated and stored coefficients and with the excitation signals.

Revendications

1. Un dispositif pour le calcul et la génération de signaux, en particulier pour la synthèse de sons numériques, comprenant
une unité arithmétique (35) pour le calcul de coefficients basé sur un modèle physique (33) d'un système oscillant, représenté sous la forme des équations aux dérivées partielles, et par les paramètres (34) du modèle physique (33),
une mémoire de coefficients (36) pour la mémorisation des coefficients calculée,
un dispositif (38) connecté à la mémoire de coefficients (36) comprenant plusieurs systèmes récurrents en parallèle (9, 11, 13), qui reproduisent chacun les oscillations naturelles (ou modes propres) du modèle physique, dont les signaux de sorties s'accumulent sous la forme d'une somme pondérée dans le signal de sortie (40) du dispositif (38), les systèmes récurrents sont composés, de plusieurs sommateurs (24, 27, 30) qui sont disposés entre les lignes à retard (26, 29), dont les constantes retards (T) sont déterminées à partir de la fréquence d'échantillonnage, et des boucles de contre réaction (25, 28) qui sont connectés aux sommateurs (24, 27, 30),
une unité d'excitation (37) connectée au dispositif(38), qui l'excite,
et une unité de commande (39) pour la commande de la mémoire de coefficients (36), de l'unité d'excitation (37) et du dispositif (38), ainsi le dispositif (38) fonctionne à partir des coefficients calculés et accumulés et des signaux d'excitation.
2. Un dispositif d'après la revendication 1, **caractérisé par le fait, que** les systèmes récurrents sont couplés ensemble.
3. Un dispositif d'après la revendication 1 ou 2, **caractérisé par**,

le design des systèmes récurrents en parallèle conçus pour traiter des fonctions d'excitation continues, les valeurs initiales et les conditions aux limites du modèle physique sous-jacent représenté sous la forme des équations aux dérivées partielles.

5 4. Un dispositif d'après l'une des revendications précédentes, **caractérisé par le fait, que** l'unité arithmétique (35) détermine les coefficients en fonction d'un modèle de fonctions de transfert simulant le comportement vibratoire d'un modèle physique d'un système oscillant

10 5. Un dispositif d'après l'une des revendications précédentes, **caractérisé par le fait, que** l'opérateur arithmétique calcule les coefficients à partir de paramètres physiques représentant les constantes physiques du système oscillant.

15 6. Un dispositif d'après l'une des revendications précédentes, **caractérisé par le fait, que** des valeurs gains des systèmes récurrents (9, 11, 13) sont mémorisées comme coefficients dans la mémoire des coefficients (36).

7. Un dispositif d'après l'une des revendications précédentes, **caractérisé par le fait, que** l'unité d'excitation (37) contienne au moins une source de signal pour exciter le dispositif.

20 8. Un procédé pour le calcul et la génération de signaux, en particulier pour la synthèse de sons numériques, comprenant les étapes suivantes :

calculer à l'aide d'une unité arithmétique (35) des coefficients en se basant sur un modèle physique (33) d'un système oscillant, représenté sous la forme des équations aux dérivées partielles, et par les paramètres (34) du modèle physique (33),

stocker les coefficients calculés dans une mémoire de coefficients (36)

émuler les vibrations propres du modèle physique par la disposition (38) de multiple systèmes récurrents en parallèle (9,11,13) dont les signaux de sorties décrivent l'enveloppe temporelle d'une seule vibration propre connecter à la mémoire de coefficients (36), dans lesquelles les signaux de sorties pondérés sont sommés pour obtenir le signal (40) sortie du dispositif (38), dans lequel les systèmes récurrents sont formés de plusieurs sommateurs (24,27,30) compris en plusieurs lignes à retards (26,29), dont les retards sont déterminés à partir de la fréquence d'échantillonnage, et des boucles de contre réaction (25, 28) qui sont connectés aux sommateurs (24, 27, 30),

exciter le dispositif (38) à l'aide de plusieurs signaux issus d'une unité d'excitation connectée au dispositif (38) et contrôler le coefficient mémoire (36), de l'unité d'excitation (37) et du dispositif (38), de manière à ce que le dispositif (38) fonctionne avec les coefficients calculés et stockés et les signaux d'excitation.

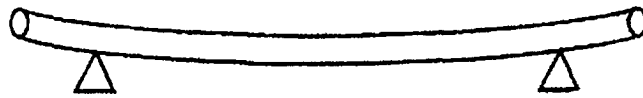


Fig. 1 Modell einer schwingenden Saite

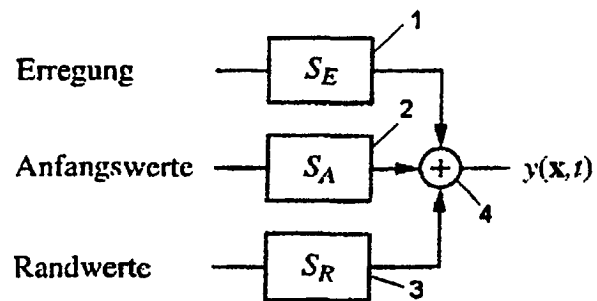


Fig. 2: Ein-Ausgangs-Beschreibung durch Übertragungsfunktionen

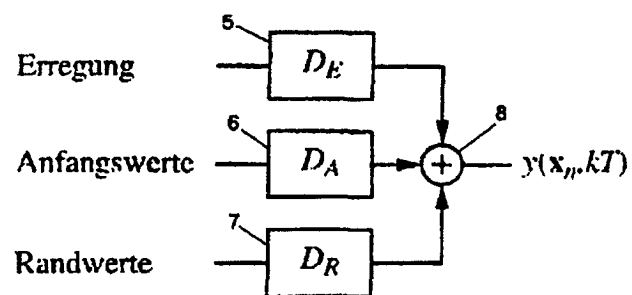


Fig. 3: Digitales System zur Nachbildung des Systems gemäß Fig. 2

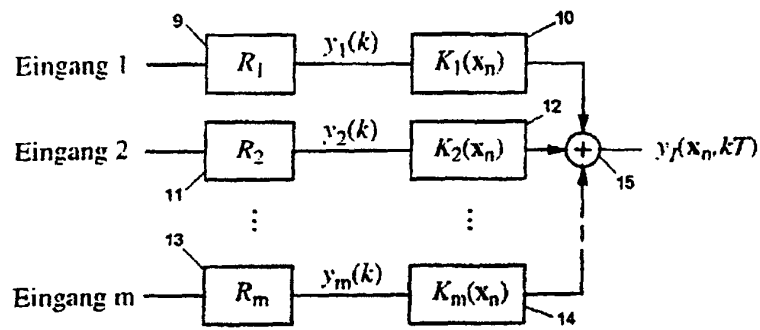


Fig. 4: Struktur eines der digitalen Systeme 5 bis 7 für Erregung, Anfangs- oder Randwerte

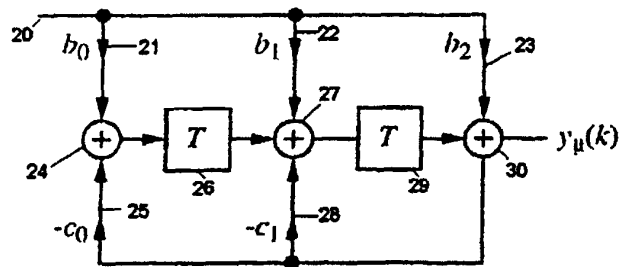


Fig. 5: Struktur eines digitalen Systems R_μ (9, 11, 13)

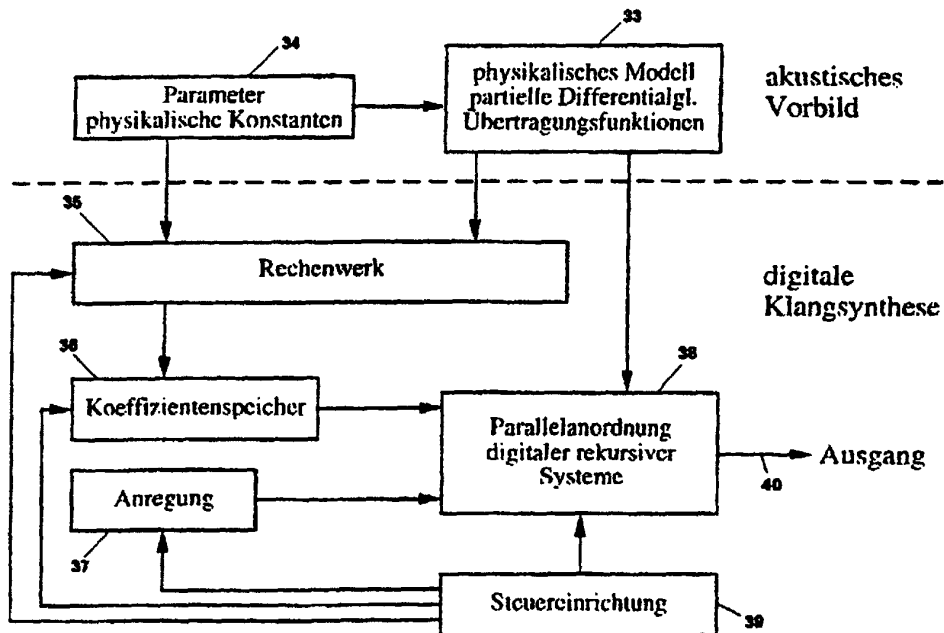


Fig. 6