



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 11 2005 003 446 T5** 2007.12.13

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2007/086817**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2005 003 446.1**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2005/030237**
(86) PCT-Anmeldetag: **25.08.2005**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **02.08.2007**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **13.12.2007**

(51) Int Cl.⁸: **A61B 8/14** (2006.01)
G06T 7/00 (2006.01)
B06B 1/06 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
10/978,175 **29.10.2004** **US**

(71) Anmelder:
General Electric Company, Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:
Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(72) Erfinder:
Smith, Lowell Scott, Niskayuna, N.Y., US;
Thomenius, Kai Erik, Clifton Park, N.Y., US;
Wodnicki, Robert G., Niskayuna, N.Y., US; Mills,
David M., Niskayuna, N.Y., US; Fisher, Rayette A.,
Niskayuna, N.Y., US; Hazard, Christopher Robert,
Niskayuna, N.Y., US

(54) Bezeichnung: **Optimierte Schaltkonfigurationen für rekonfigurierbare Arrays von Sensorelementen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Implementierung einer Schaltkonfiguration, die durch ein Netzwerk von Schaltern während einer Steuerung eines rekonfigurierbaren Arrays von Sensorelementen hervorgerufene Fehler minimiert, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

(a) Erzeugung einer anfänglichen Schaltkonfiguration; und
(b) Durchführung eines iterativen Algorithmus, das die folgenden Schritte aufweist:

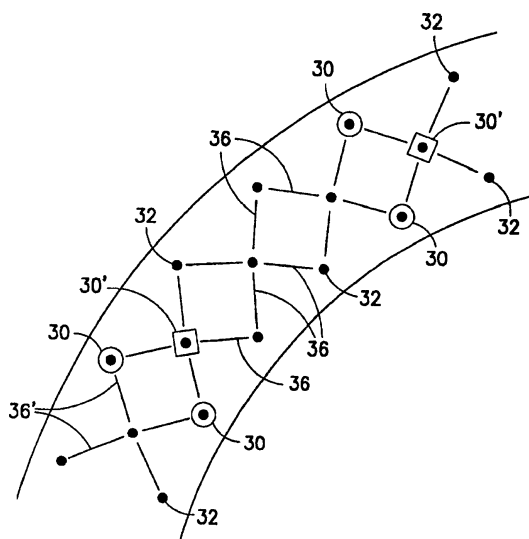
(i) Eingabe einer Schaltkonfiguration in ein Modell des Systems, das die Antwort des Systems berechnet, unter Berücksichtigung sämtlicher Schaltnetzwerkfehler, wobei die anfängliche Schaltkonfiguration zu Beginn eingegeben wird, während sukzessiv abgeleitete modifizierte Schaltkonfigurationen in Folge danach eingegeben werden;

(ii) Erzeugung eines Bildes oder Strahlungsmusters unter Verwendung des Modells mit der eingegebenen Schaltkonfiguration;

(iii) Berechnung eines Wertes für eine Kostenfunktion wenigstens zum Teil auf der Basis von Daten, die das erzeugte Muster repräsentieren;

(iv) Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion kennzeichnet; und

(v) falls der berechnete Wert kein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Modifikation...



Beschreibung**ERKLÄRUNG ÜBER VON DER US-BUNDESREGIERUNG GEFÖRDERTE FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG**

[0001] Die Regierung der Vereinigten Staaten kann gemäß dem Vertrag mit der US-Regierung mit der Nummer DAMD17-02-1-0181, anerkannt von der US-Army, gewisse Rechte an dieser Erfindung haben.

VERWANDTE PATENTANMELDUNG

[0002] Diese Anmeldung bildet eine Continuation-in-Part-Anmeldung und beansprucht Priorität der US-Patentanmeldung mit der Anmeldenummer 10/383,990, die am 6. März 2003 eingereicht worden ist und den Titel „Mosaic Arrays Using Micromachined Ultrasound Transducers“ trägt.

HINTERGRUND ZU DER ERFINDUNG

[0003] Diese Erfindung betrifft allgemein rekonfigurierbare Arrays von Sensoren (z.B. optischen, thermischen, Druck-, Ultraschallsensoren). Insbesondere betrifft die Erfindung durch Mikrobearbeitung hergestellte Ultraschallwandlerarrays (MUT-Arrays, Micromachined Ultrasonic Transducer Arrays). Eine spezielle Anwendung für MUTs liegt in Ultraschallbildgebungssystemen zur medizinischen Diagnose. Ein weiteres spezielles Beispiel stellt die zerstörungsfreie Prüfung (NDE, Non-Destructive Evaluation) von Materialien, beispielsweise Gussstücken, Schmiedestücken oder Rohrleitungen, dar.

[0004] Herkömmliche Ultraschallbildgebungssysteme weisen ein Array von Ultraschallwandlern auf, die verwendet werden, um einen Ultraschallstrahl auszusenden und anschließend den von dem gerade untersuchten Objekt reflektierten Strahl zu empfangen. Ein derartiges Scannen umfasst eine Folge von Messungen, in denen die fokussierte Ultraschallwelle ausgesandt wird, das System nach einer kurzen Zeitspanne in den Empfangsmodus umschaltet und die reflektierte Ultraschallwelle empfangen, strahlgeformt und zur Anzeige verarbeitet wird. Gewöhnlich werden das Senden und der Empfang während jeder Messung in der gleichen Richtung fokussiert, um Daten von einer Folge von Punkten entlang einer akustischen Strahllinie oder Scannlinie zu akquirieren. Der Empfänger wird entlang der Scannlinie kontinuierlich neu fokussiert, während die reflektierten Ultraschallwellen empfangen werden.

[0005] Für eine Ultraschallbildgebung weist das Array gewöhnlich eine Vielzahl von Wandlern auf, die in einer oder mehreren Zeilen bzw. Reihen angeordnet und beim Senden mit gesonderten Spannungen angesteuert werden. Durch Auswahl der Zeitverzöge-

rung (oder Phase) und Amplitude der angelegten Spannungen können die einzelnen Wandler gesteuert werden, um Ultraschallwellen hervorzubringen, die sich kombinieren bzw. einander überlagern, um eine Gesamtultraschallwelle zu bilden, die sich entlang einer bevorzugten Vektorrichtung ausbreitet und in einer ausgewählten Zone entlang des Strahls fokussiert ist.

[0006] Die gleichen Prinzipien gelten, wenn die Ultraschallsonde verwendet wird, um den reflektierten Schall in einem Empfangsmodus zu empfangen. Die an den Empfangswandlern erzeugten Spannungen werden derart aufsummiert, dass das Netto- bzw. Gesamtsignal den von einer einzelnen Fokuszone in dem Objekt reflektierten Ultraschall kennzeichnet. Wie in dem Sendemodus wird auch dieser fokussierte Empfang der Ultraschallenergie dadurch erreicht, dass dem Signal von jedem Empfangswandler eine gesonderte Zeitverzögerung (und/oder Phasenverschiebungen) gegeben wird. Die Zeitverzögerungen sind an die zunehmende Tiefe des rückkehrenden Signals angepasst, um beim Empfang eine dynamische Fokussierung zu erzielen.

[0007] Die Qualität oder Auflösung des erzeugten Bildes ist zum Teil von der Anzahl von Wandlern abhängig, die jeweils die Sende- und Empfangsaperaturen des Wandlerarrays bilden. Zur Erzielung einer hohen Bildqualität ist folglich eine große Anzahl von Wandlern sowohl für zwei- als auch für dreidimensionale Bildgebungsanwendungen erwünscht. Die Ultraschallwandler sind gewöhnlich in einer von Hand gehaltenen Wandlersonde angeordnet, die über ein flexibles Kabel mit einer Elektronikereinheit verbunden ist, die die Wandler signale verarbeitet und Ultraschallbilder erzeugt. Die Wandlersonde kann sowohl eine Ultraschallsendesaltung als auch eine Ultraschallempfangsschaltung tragen.

[0008] Ein rekonfigurierbares Ultraschallarray ist eines, das Gruppen von Subelementen ermöglicht, in dynamischer Weise miteinander verbunden zu werden, so dass erzielt werden kann, dass die Gestalt des resultierenden Elementes mit der Gestalt der Wellenfront übereinstimmt. Dies kann zu einem verbesserten Verhalten und/oder einer reduzierten Kanalanzahl führen. Eine Rekonfigurierbarkeit kann unter Verwendung eines Schaltnetzwerks erreicht werden.

[0009] Wenn überhaupt, so ist nur wenig Arbeit auf Algorithmen zur Verbesserung des Leistungsverhaltens der zur Strahlformung erforderlichen Schaltnetzwerke aufgewandt worden. Jedoch ist ein Schalten oder Multiplexen in einigen Fällen für eine viel stärker eingeschränkte Rekonfigurierbarkeit verwendet worden. Beispiele hierfür umfassen: Multiplexen mit synthetischen Apperturen zur Vergrößerung der Apperturgröße, mehrreihige Arrays und das zum Scannen

in linearen Arrays eingesetzte Multiplexen. In all diesen Fällen ist die Rekonfigurierbarkeit äußerst eingeschränkt, und der Bedarf nach einer Optimierung des Schaltnetzwerks wird vermieden.

[0010] In letzter Zeit sind Halbleiterprozesse dazu verwendet worden, Ultraschallwandler einer als mikrobearbeitete Ultraschallwandler (MUTs, Micro-machined Ultrasonic Transducers) bekannten Bauart herzustellen, die von der kapazitiven (MUT) oder piezoelektrischen Art (pMUT) sein können. MUTs sind winzige membranartige Vorrichtungen mit Elektroden, die die Schallschwingung eines empfangenen Ultraschallsignals in eine modulierte elektrische Kapazität umwandeln. Zum Senden wird die kapazitiven Ladung moduliert, um die Membran der Vorrichtung schwingen zu lassen und dadurch eine Schallwelle auszusenden. Ein Vorteil der MUTs besteht darin, dass sie unter Verwendung von Halbleiterfertigungsprozessen, beispielsweise Mikrofertigungsprozessen, die unter dem Oberbegriff „Mikrobearbeitung“ zusammengefasst werden, hergestellt werden können. Die aus derartigen Mikrobearbeitungsprozessen resultierenden Systeme werden gewöhnlich als „mikrobearbeitete elektromechanische Systeme“ (MEMS, Micromachined Electro-Mechanical Systems) bezeichnet.

[0011] Die cMUTs sind gewöhnlich hexagonalförmige Strukturen, die eine über diese gespannte Membran aufweisen. Diese Membran wird durch eine angelegte Vorspannung nahe an der Substratoberfläche gehalten. Durch Anwendung eines Schwingungssignals auf den bereits vorgespannten cMUT, kann die Membran zum Schwingen veranlasst werden, wodurch es ihr ermöglicht wird, Schallenergie auszustrahlen. In gleicher Weise können die beim Auftreffen von Schallwellen auf die Membran entstehenden Schwingungen in Form von Spannungsveränderungen auf dem cMUT erfasst werden. Eine cMUT-Zelle ist der Ausdruck, der verwendet wird, um eine einzelne dieser hexagonalen „Trommel“-Strukturen zu beschreiben. Die cMUT-Zellen können sehr kleine Strukturen sein. Typische Zellenabmessungen betragen 25–50 Abmessungen von einem flachen Rand zum anderen flachen Rand auf dem Hexagon. Die Abmessungen der Zellen sind in vielfältiger Weise durch die ausgelegte akustische Antwort bestimmt. Es kann evtl. nicht möglich sein, größere Zellen zu erzeugen, die hinsichtlich der gewünschten Frequenzantwort und Empfindlichkeit immer noch gut funktionieren.

[0012] Bedauerlicherweise ist es schwierig, eine Elektronik zu erzeugen, die eine individuelle Steuerung bei derart kleinen Zellen ermöglichen würde. Während im Hinblick auf das akustische Verhalten des Arrays in seiner Gesamtheit die kleine Zellengröße hervorragend ist und zu einer großen Flexibilität führt, ist die Steuerung auf größere Strukturen be-

grenzt. Eine gemeinsame Gruppierung mehrerer Zellen und ihre elektrische Verbindung ermöglicht es, ein größeres Subelement zu erzeugen, das die individuelle Steuerung aufweisen kann, während das gewünschte akustische Antwortverhalten aufrechterhalten wird. Ein derartiges Subelement ist eine Gruppe von elektrisch miteinander verbundenen Zellen, die nicht rekonfiguriert werden können. Für die Zwecke dieser Offenbarung ist das Subelement die kleinste unabhängig steuerbare akustische Einheit. Durch Verbindung von Subelementen untereinander unter Verwendung eines Schaltnetzwerks können Ringe oder Elemente geschaffen werden. Die Elemente können rekonfiguriert werden, indem der Zustand des Schaltnetzwerks verändert wird. Jedoch weisen Subelemente miteinander verbundene Zellen auf, die nicht durch Schalten voneinander getrennt und somit nicht rekonfiguriert werden können. Die gesamte folgende Analyse ist auch gültig, wenn das Array aus PZT oder durch irgendeine andere üblichere oder künftige Wandlertechnologie hergestellt ist.

[0013] Eine Rekonfigurierbarkeit bei Ultraschallwandlersubelementen auf Siliziumbasis ist in der US-Patentanmeldung mit der Anmeldenummer 10/383,990 beschrieben. Eine Form der Rekonfigurierbarkeit ist das mosaikartige ringförmige Array, das ebenfalls in dieser Patentanmeldung beschrieben ist. Das Konzept des mosaikartigen ringförmigen Arrays umfasst die Bildung von kreisringförmigen Elementen durch Gruppierung von Subelementen unter Verwendung eines rekonfigurierbaren elektronischen Schaltnetzwerks. Das Ziel besteht darin, die Anzahl von Strahlformungskanälen unter Aufrechterhaltung der Bildqualität und Verbesserung der Schichtdicke zu reduzieren. Zur Reduktion von Systemkanälen verwendet das mosaikartige ringförmige Array die Tatsache, dass bei einem ungesteuerten Strahl die Verzögerungskonturen auf der Oberfläche des zugrundeliegenden zweidimensionalen Wandlerarrays kreisförmig sind. In anderen Worten stellen die Isoverzögerungskurven (mit gleichen Verzögerungen) Ringe um das Zentrum des Strahls dar. Die Kreis-symmetrie der Verzögerungen führt zu der naheliegenden Gruppierung dieser Subelemente mit gleichen gemeinsamen Verzögerungen und führt zu dem Konzept eines Ringarrays. Die Rekonfigurierbarkeit kann dazu verwendet werden, den Strahl entlang des größeren zugrundeliegenden zweidimensionalen Wandlerarrays schrittweise weiterzuführen, um einen Scann oder ein Bild zu erzeugen. Die Rekonfigurierbarkeit kann auch zur Verbesserung des Verhaltens für Mehrfach-Sendeanwendungen verwendet werden, indem mehrere Kanäle der kleineren aktiven Apertur in dem Nahfeld zugewiesen werden. Es gibt viele weitere Anwendungen, in denen sich eine Rekonfigurierbarkeit als nützlich erweist.

[0014] Rekonfigurierbare Ultraschallwandler erfordern ein komplexes Schaltnetzwerk, dessen Imple-

mentierung mit momentan verfügbarer Elektronik sich schwierig gestalten oder nicht ausführbar sein kann. Es besteht ein Bedarf nach einem vereinfachten Schaltnetzwerk, das durch eine sorgfältige Auswahl der Schaltkonfiguration ein optimales Leistungsverhalten aufrechterhalten kann.

KURZBESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0015] Die Erfindung betrifft rekonfigurierbare Arrays von Sensoren sowie Verfahren zur Optimierung der Schaltkonfiguration für derartige Arrays (d.h. zur Maximierung deren Leistungsverhaltens). Die Sensoren können optische, thermische Sensoren oder Drucksensoren oder Ultraschallwandler sein. Die hier beschriebene Ausführungsform verwendet ein zweidimensionales Array von kapazitiven mikrobearbeiteten Ultraschallwandlern (cMUTs) als das zugrundeliegende Gitter, von dem aus größere Elemente aufgebaut werden. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht auf cMUT-Strukturen beschränkt, sondern in gleicher Weise auf andere herkömmliche oder zukünftige Wandlertechnologien anwendbar.

[0016] Ein Aspekt der Erfindung stellt ein Verfahren zur Implementierung einer Schaltkonfiguration dar, die die durch ein Netzwerk von Schaltern während einer Steuerung eines rekonfigurierbaren Arrays von Sensorelementen hervorgerufenen Fehler auf ein Minimum reduziert, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: (a) Erzeugung einer anfänglichen Schaltkonfiguration; und (b) Durchführung eines iterativen Algorithmus, das die folgenden Schritte aufweist: (i) Eingabe einer Schaltkonfiguration in ein Modell des Systems, das die Antwort des Systems unter Berücksichtigung sämtlicher Schaltnetzwerkfehler berechnet, wobei die anfängliche Schaltkonfiguration zu Beginn eingegeben und sukzessiv abgeleitete modifizierte Schaltkonfigurationen danach in Folge eingegeben werden; (ii) Erzeugung eines Bildes oder Strahlungsmusters unter Verwendung des Modells mit der eingegebenen Schaltkonfiguration; (iii) Berechnung eines Wertes für eine Kostenfunktion auf der Basis wenigstens zum Teil der das erzeugte Muster repräsentierenden Daten; (iv) Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt; und (v) falls der berechnete Wert nicht ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Modifikation der momentanen Schaltkonfiguration in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Werteberechnung, um zu einer modifizierten Schaltkonfiguration zu gelangen, wobei die Schritte (i) bis (v) für jede Schaltkonfiguration wiederholt werden; und (c) falls der berechnete Wert ein Minimum für die Kostenfunktion ist, Konfiguration des Schaltnetzwerks mit der modifizierten Schaltkonfiguration, die eine Minimierung des Kostenfunktionswertes bewirkt hat.

[0017] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein

Verfahren zur Implementierung einer Schaltkonfiguration, die die Fehler auf ein Minimum reduziert, die durch ein Netzwerk von Schaltern während einer Steuerung eines rekonfigurierbaren Arrays von Sensorelementen eingebracht werden, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: (a) Erzeugung einer anfänglichen Schaltkonfiguration; und (b) Durchführung eines iterativen Algorithmus, der die folgenden Schritte aufweist: (i) Eingabe einer Schaltkonfiguration in ein System, wobei die Anfangsschaltkonfiguration zu Beginn eingegeben wird und sukzessiv abgeleitete modifizierte Schaltkonfigurationen in der Folge danach eingegeben werden; (ii) Bestimmung des Verhaltens des Systems mit der eingegebenen Schaltkonfiguration; (iii) Berechnung eines Wertes einer Kostenfunktion wenigstens zum Teil auf der Basis der das bestimmte Verhalten des Systems repräsentierenden Daten; (iv) Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt; und (v) falls der berechnete Wert nicht ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Modifikation der momentanen Schaltkonfiguration in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Werteberechnung, um zu einer modifizierten Schaltkonfiguration zu gelangen, wobei die Schritte (i) bis (v) für jede Schaltkonfiguration wiederholt werden; und (c) falls der berechnete Wert ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Konfiguration des Schaltnetzwerks mit der modifizierten Schaltkonfiguration, die dazu geführt hat, dass der Kostenfunktionswert minimiert worden ist.

[0018] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallbildgebungssystems, das ein Array von Ultraschallwandlerelementen aufweist, die durch Steuerung der jeweiligen Zustände eines Netzwerks von Schaltern neu konfiguriert werden können, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: (a) Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem ersten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems; und (b) Optimierung einer zweiten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem zweiten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems, wobei die Optimierungsschritte eine Minimierung einer Kostenfunktion unter Verwendung eines iterativen Algorithmus aufweisen.

[0019] Ein noch weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallbildgebungssystems, das ein Array von Ultraschallwandlerelementen aufweist, die durch Steuerung der jeweiligen Zustände eines Netzwerks von Schaltern neu konfigurierbar sind, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: (a) Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem ersten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems durch Minimierung einer ersten Kostenfunktion unter Verwendung eines ersten iterativen Algorithmus; und (b) Optimierung einer zweiten Schalt-

konfiguration zur Verwendung in einem zweiten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems durch Minimierung einer zweiten Kostenfunktion unter Verwendung eines zweiten iterativen Algorithmus, wobei sich die zweite Kostenfunktion von der ersten Kostenfunktion unterscheidet.

[0020] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallbildgebungssystems, das ein Array von Ultraschallwandlerelementen aufweist, die durch Steuerung der jeweiligen Zustände eines Netzwerks von Schaltern rekonfigurierbar sind, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: (a) Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration, die eine erste Apertur einrichtet, die einen ersten Satz ausgewählter Ultraschallwandlerelemente aufweist; und (b) Optimierung einer zweiten Schaltkonfiguration, die eine zweite Apertur einrichtet, die einen zweiten Satz ausgewählter Ultraschallwandlerelemente aufweist, wobei das Strahlzentrum der zweiten Apertur um einen Bruchteil eines Ultraschallwandlerelementes in Bezug auf das Strahlzentrum der ersten Apertur fortgeschaltet wird.

[0021] Weitere Aspekte der Erfindung sind nachstehend beschrieben und beansprucht.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0022] [Fig. 1](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Querschnittsansicht einer typischen cMUT-Zelle.

[0023] [Fig. 2](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines „Gänseblume“ („Daisy“-)Subelementes, das aus sieben hexagonalen MUT-Zellen gebildet ist, deren obere und untere Elektroden jeweils ohne dazwischen eingefügte Schalter miteinander verbunden sind. Diese Zeichnung ist der US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10/383,990 entnommen.

[0024] [Fig. 3](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines Sektors eines vier ringförmige Elemente aufweisenden Mosaikarrays, wie es in der US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10/383,990 beschrieben ist, wobei jedes Element aus einer Mosaikanordnung von „Gänseblumen“-Subelementen besteht, die konfiguriert sind, um einen annähernd gleichen Flächenbereich pro Element zu haben.

[0025] [Fig. 4](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Querschnittsansicht eines kointegrierten cMUT- und anwendungsspezifischen integrierten Schaltungs (ASIC)-Arrays.

[0026] [Fig. 5](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Querschnittsansicht eines

cMUT-Wafers, der mit einer ASIC-Schaltmatrix verbunden ist.

[0027] [Fig. 6](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Draufsicht auf ein hexagonales Array von cMUT-Subelementen über einem hexagonalen Array zugehöriger Einheitsschaltzellen.

[0028] [Fig. 7](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Draufsicht auf ein hexagonales Array von cMUT-Subelementen über einem rechteckigen Array zugehöriger Einheitsschaltelemente.

[0029] [Fig. 8](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Verschiebung eines ringförmigen Wandlerelementes quer durch ein Array.

[0030] [Fig. 9](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Architektur, in der sämtliche Systemkanäle über das Array hinweg derart verteilt angeordnet sind, dass jedes Wandlersubelement zu jedem Systemkanal Zugang hat.

[0031] [Fig. 10](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Architektur, in der die Anzahl von Schaltern in jedem Subelement derart begrenzt ist, dass eine einzige Busleitung pro Reihe von Subelementen vorgesehen ist, wobei die Busleitungen über einen Multiplexer mit den Systemkanälen verbunden sind.

[0032] [Fig. 11](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Architektur mit mehreren Busleitungen pro Reihe von Subelementen, die es ermöglicht, Subelemente auf unterschiedlichen Systemkanälen innerhalb der gleichen Reihe gemeinsam zu gruppieren.

[0033] [Fig. 12](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Architektur entsprechend einer Ausführungsform der Erfindung, die es ermöglicht, ein Subelement in einer ersten Reihe mit einer Busleitung für eine zweite Reihe von Subelementen zu verbinden, indem dieses mit einem Zugangsschalter eines benachbarten Subelementes in der zweiten Reihe über einen Matrixschalter des Subelementes in der ersten Reihe verbunden wird.

[0034] [Fig. 13](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Architektur gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung, die es ermöglicht, ein bestimmtes Subelement in einer bestimmten Reihe eines cMUT-Arrays mit einer beliebigen von einer Vielzahl von Systemkanalbusleitungen zu verbinden.

[0035] [Fig. 14](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines hexagonalen Arrays von Subelementen mit Busleitungen, die mit jeweiligen Spalten von Subelementen über (durch feste Punkte angezeigte) Zugangsschalter verbunden sind.

[0036] [Fig. 15](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines hexagonalen Arrays von Subelementen, wobei einige Subelemente mit vertikalen und horizontalen Busleitungen über jeweilige (durch feste Punkte angezeigte) Zugangsschalter verbunden sind.

[0037] [Fig. 16](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines hexagonalen Arrays von Subelementen mit Busleitungen, die diagonal entlang der natürlichen Achsen des hexagonalen Arrays angeordnet sind. Die Zugangsschalter sind durch feste Punkte angedeutet.

[0038] [Fig. 17](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung von Verbindungen zu einem gemeinsamen Verbindungspunkt in der Elektronik, die einem bestimmten akustischen Subelement zugeordnet ist, gemäß der in [Fig. 13](#) dargestellten Ausführungsform.

[0039] [Fig. 18](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines Zugangsschalters und Schaltkreises zur Steuerung des Zustandes dieses Zugangsschalters, wie bisher in der US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10/248,968 beschrieben.

[0040] [Fig. 19](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Anordnung von Zugangs- und Matrixschaltern zur Verwendung im Zusammenhang mit Ringen (deren Abschnitte durch mit Strichlinie eingezeichnete Bögen angedeutet sind) mit einer Einzelsubelementweite, die eng zusammengepackt sind. Zugangsschalter sind durch feste Punkte angezeigt; Matrixschalter sind durch Bindestriche angezeigt.

[0041] [Fig. 20](#) zeigt ein Schaltbild, das eine verteilte RC-Verzögerungsleitung repräsentiert.

[0042] [Fig. 21](#) zeigt eine graphische Darstellung gemessener Verzögerungsdaten für eine RC-Verzögerungsleitung mit zwanzig Anzapfstellen.

[0043] [Fig. 22](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Reihe von Subelementen, die durch Matrixschalter in Reihe miteinander verbunden sind, wobei das Subelement an einem Ende der Reihe durch einen Zugangsschalter mit einer Busleitung verbunden ist.

[0044] [Fig. 23](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Reihe von Subelementen, wobei die Subelemente an den Enden der Reihe durch jeweilige Zugangsschalter mit einer Busleitung verbunden sind und die restlichen Subelemente über Matrixschalter an den einen oder den anderen Zugangsschalter angeschlossen sind.

[0045] [Fig. 24](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Reihe von Subelementen, wobei die Subelemente an den Enden der Reihe und ein einzelnes Subelement in der Nähe der Mitte der Reihe durch jeweilige Zugangsschalter mit einer Busleitung verbunden sind, während die restlichen Subelemente über Matrixschalter mit einem jeweiligen Zugangsschalter verbunden sind.

[0046] [Fig. 25](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung zunehmender Zeitverzögerungen rund um einen ringförmigen Ring von Subelementen mit steigenden Abständen zu einem abgelegenen Zugangsschalter.

[0047] [Fig. 26](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung einer Vergrößerung der Verzögerungen rund um einen ringförmigen Ring von Subelementen bei steigenden Abständen zu jeweiligen Zugangsschaltern, die in jedem Quadranten angeordnet sind.

[0048] [Fig. 27](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung steigender Verzögerungen in einem ringförmigen Ring von Subelementen mit steigenden Abständen zu einem Zugangsschalter. Der ringförmige Ring weist eine Weite auf, die größer ist als ein Subelement.

[0049] [Fig. 28](#) zeigt eine Zeichnung unter Veranschaulichung eines Falls, in dem mehrere Zugangsschalter über die Weite eines kreisringförmigen Rings hinweg verwendet werden. Die festen Punkte repräsentieren akustische Subelemente; die Kreise veranschaulichen die Anordnung von Zugangsschaltern entsprechend einer Auslegung; und die Quadrate veranschaulichen die Anordnung von Zugangsschaltern entsprechend einer anderen Auslegung.

[0050] Es wird nun auf die Zeichnungen Bezug genommen, in denen ähnliche Elemente in unterschiedlichen Zeichnungen die gleichen Bezugszeichen tragen.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0051] Die Erfindung betrifft eine rekonfigurierbare Schaltmatrix und ein Verfahren zur Optimierung von Schaltkonfigurationen für eine derartige Matrix sowie ihr zugeordnetes Array von Sensorelementen. Für die Zwecke der Veranschaulichung sind das rekonfigurierbare Array und das Optimierungsverfahren in Bezug auf kapazitive mikrobearbeitete Ultraschallwandler (cMUTs) beschrieben. Jedoch sollte es verständlich sein, dass die Aspekte der hier offenbarten Erfindung nicht auf ihre Anwendung auf Sonden, die cMUTs verwenden, beschränkt sind, sondern dass sie auch auf Sonden angewandt werden können, die pMUTs oder sogar würfel- oder chipförmige piezokeramische Arrays verwenden, in denen jedes der würfel- bzw. chipförmigen Subelemente durch Verbin-

dungsmittel mit einer zugrundeliegenden Schaltebene verbunden sind. Die gleichen Aspekte der Erfindung sind ebenfalls auf rekonfigurierbare Arrays von optischen Sensoren, thermischen Sensoren oder Drucksensoren anwendbar.

[0052] Bezugnehmend auf [Fig. 1](#) ist eine gewöhnliche cMUT-Wandlerzelle **2** im Querschnitt veranschaulicht. Ein Array von derartigen cMUT-Wandlerzellen wird gewöhnlich auf einem Substrat **4**, beispielsweise einem stark dotierten Siliziumwafer (somit Halbleiterwafer) erzeugt. Bei jeder cMUT-Wandlerzelle ist oberhalb des Substrats **4** eine dünne Membran oder Membranwand **8** aufgehängt, die aus Siliziumnitrid hergestellt sein kann. Die Membran **8** ist an ihrem Rand durch einen isolierenden Träger **6** gehalten, der aus Siliziumdioxid oder Siliziumnitrid hergestellt sein kann. Der Hohlraum **14** zwischen der Membran **8** und dem Substrat **4** kann mit Luft oder einem Gas gefüllt oder vollständig oder teilweise evakuiert sein. Gewöhnlich sind cMUTs so vollständig, wie es die Prozesse ermöglichen, evakuiert. Ein Film oder eine Schicht eines leitfähigen Materials, beispielsweise einer Aluminiumlegierung oder eines sonstigen geeigneten leitfähigen Werkstoffs, bildet eine Elektrode **12** an der Membran **8**, während ein weiterer Film oder eine Schicht, die aus einem leitfähigen Material hergestellt ist, eine Elektrode **10** an dem Substrat **4** bildet. Alternativ kann die untere Elektrode auch durch geeignetes Dotieren des halbleitenden Substrats **4** gebildet sein.

[0053] Die beiden Elektroden **10** und **12**, die durch den Hohlraum **14** voneinander getrennt sind, bilden eine Kapazität. Wenn ein auftretendes Schaltsignal die Membran **8** zum Schwingen veranlasst, kann die Schwingung in der Kapazität unter Verwendung einer zugehörigen (in [Fig. 1](#) nicht veranschaulichten) Elektronik erfasst werden, wodurch das Schaltsignal in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Umgekehrt beeinflusst bzw. steuert ein Wechselspannungssignal, das an eine der Elektroden angelegt wird, die Ladung an der Elektrode, die wiederum eine Beeinflussung bzw. Steuerung der kapazitiven Kraft zwischen den Elektroden zur Folge hat, wobei die Letztere die Membran veranlasst, sich zu bewegen und dadurch ein Schallsignal auszusenden.

[0054] Die einzelnen Zellen weisen runde, rechteckige, hexagonale oder sonstige Randgestalten auf. Hexagonale Formen ergeben eine dichte Packung der cMUT-Zellen eines Wandlersubelementes. Die cMUT-Zellen können unterschiedliche Abmessungen haben, so dass die Wandlersubelemente aus den verschiedenen Zellengrößen zusammengesetzte Eigenschaften aufweisen, die dem Wandler eine Breitbandcharakteristik verleihen.

[0055] Bedauerlicherweise ist es schwierig, eine Elektronik zu erzeugen, die eine individuelle Steue-

rung über derart kleinen Zellen ermöglichen würde. Während hinsichtlich des akustischen Verhaltens des Arrays als Ganzes die kleine Zellengröße hervorragend ist und zu einer großen Flexibilität führt, ist eine Steuerung auf größere Strukturen begrenzt. Eine gemeinsame Gruppierung mehrerer Zellen und ihre elektrische Verbindung ermöglicht es, ein größeres Subelement zu erzeugen, das die individuelle Steuerung aufweisen kann, während das gewünschte akustische Antwortverhalten aufrechterhalten wird. Es können Ringe oder Elemente durch Verbindung von Subelementen unter Verwendung eines Schaltnetzwerks gebildet werden. Die Elemente können durch Veränderung des Zustands des Schaltnetzwerks neu konfiguriert werden. Jedoch können einzelne Subelemente nicht neu konfiguriert werden, um unterschiedliche Subelemente zu bilden.

[0056] MUT-Zellen können miteinander (d.h. ohne dazwischen geschaltete Schalter) in dem Mikrobearbeitungsprozess verbunden sein, um Subelemente zu erzeugen. Der Ausdruck „akustisches Subelement“ oder „Schallsubelement“ wird im Folgenden verwendet, um ein derartiges Cluster bzw. eine derartige Gruppe zu beschreiben. Diese akustischen Subelemente werden durch mikroelektronische Schalter miteinander verbunden, um größere Elemente zu bilden, indem derartige Schalter in der Siliziumschicht oder auf einem anderen Substrat, das unmittelbar neben dem Wandlerarray angeordnet ist, platziert werden.

[0057] In dem hier verwendeten Sinne bezeichnet der Ausdruck „akustisches Subelement“ bzw. „Schallsubelement“ eine einzelne Zelle oder eine Gruppe von elektrisch miteinander verbundenen Zellen, die nicht rekonfiguriert werden können, was bedeutet, dass das Subelement die kleinste unabhängig von anderen steuerbare akustische Einheit bildet. Der Ausdruck „Subelement“ meint ein akustisches Subelement und seine zugehörige integrierte Elektronik. Ein „Element“ ist durch Verbindung von Subelementen unter Verwendung eines Schaltnetzwerks gebildet. Die Elemente können rekonfiguriert werden, indem der Zustand des Schaltnetzwerks verändert wird. Wenigstens einige der in dem Schaltnetzwerk enthaltenen Schalter sind Teil der „zugehörigen integrierten Elektronik“, wie dies in größeren Einzelheiten nachstehend erläutert ist.

[0058] Für die Zwecke der Veranschaulichung zeigt [Fig. 2](#) ein „Gänseblume“-förmiges („Daisy“) Wandlersubelement **16**, das aus sieben hexagonalen cMUT-Zellen **2** erzeugt ist: Eine zentrale Zelle ist von einem Ring mit sechs Zellen umgeben, wobei jede Zelle in dem Ring mit einer jeweiligen Seite der zentralen Zelle und den benachbarten Zellen in dem Ring zusammenhängt. Die oberen Elektroden **12** jeder cMUT-Zelle **2** sind durch Verbindungen, die nicht durch Schalten unterbrochen werden können, elek-

trisch miteinander gekoppelt. In dem Fall eines hexagonalen Arrays führen sechs Leiter strahlenförmig von der oberen Elektrode **12** nach außen weg und sind jeweils mit den oberen Elektroden der benachbarten cMUT-Zellen verbunden (außer in dem Fall der Zellen an dem Rand, die mit drei, nicht sechs weiteren Zellen verbunden sind). In ähnlicher Weise sind die unteren Elektroden **10** aller Zellen **2** durch Verbindungen elektrisch miteinander gekoppelt, die nicht durch Schalten voneinander getrennt werden können, wodurch ein sieben Mal größeres kapazitives Wandlersubelement **16** gebildet ist.

[0059] Subelemente der in [Fig. 2](#) veranschaulichten Art können eingerichtet sein, um ein zweidimensionales Array auf einem halbleitenden (z.B. aus Silizium hergestellten) Substrat zu bilden. Diese Subelemente können mit einem Schaltnetzwerk rekonfiguriert werden, um Elemente, beispielsweise kreisringförmige Ringe, zu bilden. Eine Rekonfigurierbarkeit unter Verwendung auf Silizium basierender Ultraschallwandlersubelemente ist in der US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10/383,990 beschrieben. Eine Form der Rekonfigurierbarkeit bildet das Mosaikringarray, das ebenfalls in dieser Patentanmeldung beschrieben ist. Das Konzept des mosaikartigen kreisringförmigen Arrays umfasst die Bildung kreisringförmiger Elemente durch gemeinsame Gruppierung von Subelementen unter Verwendung eines rekonfigurierbaren elektronischen Schaltnetzwerks. Das Ziel besteht darin, die Anzahl von Strahlformungskanälen zu reduzieren, wobei gleichzeitig die Bildqualität aufrechterhalten werden und die Schichtdicke verbessert sein soll. Zur Reduktion von Systemkanälen nutzt das mosaikartige Ringarray die Tatsache, dass für einen ungesteuerten Strahl die Verzögerungskonturen auf der Fläche des zugrundeliegenden zweidimensionalen Wandlerarrays kreisförmig sind. In anderen Worten sind die die gleiche Verzögerung aufweisenden Isoverzögerungskurven durch über dem Zentrum des Strahls angeordnete Ringe gebildet. Die Kreissymmetrie der Verzögerungen hat die naheliegende Gruppierung dieser Subelemente mit gleichen, gemeinsamen Verzögerungen zur Folge. Die Rekonfigurierbarkeit kann verwendet werden, um den Strahl entlang des größeren zugrundeliegenden zweidimensionalen Wandlerarrays fortzuschalten, um einen Scann oder ein Bild zu erzeugen.

[0060] Es gibt zahlreiche Möglichkeiten zur Erzeugung von Wandlerarrays unter Verwendung von MUT-Zellen und akustischen Subelementen. [Fig. 3](#) veranschaulicht ein Beispiel für Mosaikanordnungen von akustischen Subelementen zur Erzeugung eines mosaikartigen Arrays. In der in [Fig. 3](#) veranschaulichten Ausführungsform sind vier annähernd kreisringförmige Elemente (die jeweils mit den Bezugszeichen **18A–D** bezeichnet sind), von denen jedes eine Mosaikanordnung von „gänseblumen“-förmigen

akustischen Subelementen aufweist (wobei sieben MUT-Zellen pro Subelementen miteinander verbunden sind), derart konfiguriert, dass sie ungefähr die gleiche Fläche pro Element haben. Die Mosaikanordnung kann in jedem Fall aus mehreren Subelementarten gebildet sein. Das Arraymuster muss nicht eine Mosaik sein, sondern kann Bereiche ohne akustische Subelemente aufweisen. Beispielsweise können Durchkontaktierungen enthalten sein, die die Verbindungen der oberen Elektrode des akustischen Subelementes oder der Zellen bis unter das Array führen.

[0061] Die Konfigurationen der Erfindung können verändert werden, um verschiedene akustische Parameter, wie beispielsweise die Strahlweite, das Maß der Nebenkeule oder die Tiefe des Fokuspunktes, zu optimieren. Alternativ können die akustischen Subelemente gemeinsam gruppiert, um eine einzelne Appertur für den Sendebetrieb zu bilden, und sofort zu einer anderen Appertur für den Empfangsteil umgeschaltet werden. Während [Fig. 3](#) jeweilige Abschnitte von annähernd kreisringförmigen Elementen veranschaulicht, können andere Konfigurationen, z.B. diskontinuierliche Ringe, Oktalringe oder Bögen, verwirklicht werden. Die Wahl des Musters hängt von den Anforderungen der Anwendung ab.

[0062] Die meisten Apperturen bestehen aus zusammenhängenden, gruppierten Subelementen, die miteinander verbunden sind, um ein einzelnes größeres Element, beispielsweise die in [Fig. 3](#) veranschaulichten kreisringförmigen Elemente, zu bilden. In diesem Fall ist es nicht erforderlich, jedes Subelement unmittelbar an seine zugehörige Busleitung anzuschließen. Es reicht aus, eine begrenzte Anzahl von Subelementen in einer gegebenen Gruppe anzuschließen und dann die restlichen Subelemente miteinander zu verbinden. Auf diese Weise wird das Sendesignal von dem System entlang der Busleitungen und in das Element hinein über eine begrenzte Anzahl von Zugangspunkten weitergeleitet. Von da aus breitet sich das Signal in dem Element über lokale Verbindungen aus.

[0063] Wenn eine bestimmte Geometrie vorgegeben ist, mappt das rekonfigurierbare Array akustische Subelemente auf Systemkanäle bzw. ordnet diese den Systemkanälen zu. Dieses Mapping oder diese Zuordnung ist dazu eingerichtet, ein verbessertes Verhalten zu erzielen. Das Mapping wird durch ein Schaltnetzwerk vorgenommen, das idealerweise unmittelbar in dem Substrat platziert ist, auf dem die cMUT-Zellen ausgebildet sind, wobei es jedoch auch in einem anderen Substrat neben dem Wandlersubstrat integriert sein kann. Da cMUT-Arrays unmittelbar auf der Oberseite eines Siliziumsubstrats aufgebaut werden, kann die Schaltelektronik in dieses Substrat eingefügt werden. Für ein PZT oder eine eher herkömmliche Implementierung würde das Schaltnetzwerk einfach in einem gesonderten Silizi-

umsubstrat erzeugt und an dem PZT-Array angebracht werden.

[0064] Eine Querschnittsansicht eines kointegrierten cMUT- und ASIC-Arrays ist in [Fig. 4](#) veranschaulicht, um zu zeigen, auf welche Weise die Verbindungen von dem ASIC zu den cMUTs hergestellt sein würden. Wie veranschaulicht, wird eine einzelne Durchkontaktierung **56** verwendet, um jedes cMUT-Subelement **32** mit einem seinen Gegenpart bildenden CMOS-Subelement (oder einer „Zelle“) **50** zu verbinden. Die Durchkontaktierungen **56**, die Signalelektroden mit jeweiligen leitfähigen Anschlussinseln **66** verbinden, die an dem Schalter-ASIC ausgebildet sind, können in einer akustischen Trägerschicht **62** eingebettet sein.

[0065] Es ist auch möglich, die cMUTs auf einem gesonderten Wafer auszubilden und diese mit der ASIC-Schaltmatrix gesondert zu verbinden, wie dies in [Fig. 5](#) veranschaulicht ist. Hier werden beispielsweise Lötperlen **64** und leitfähige Anschlussinseln **66** verwendet, um die einzelnen cMUT-Subelemente **32** mit ihren Gegenstücken **50** der Schaltelektronik zu verbinden. Es können auch andere Packungstechniken, wie beispielsweise ein anisotropischer leitfähiger Film (ACF, Anisotropic Conductive Film) oder eine flexible Zwischenverbindung, verwendet werden.

[0066] Für eine optimale Packungsdichte ist es nützlich, die cMUT-Subelemente **32** und die zugehörige Elektornik auf einem hexagonalen Gitter oder Raster kachelartig anzuordnen, wie es in [Fig. 6](#) veranschaulicht ist, die eine Draufsicht auf die ASIC-Schaltmatrix zeigt. Hier sind die CMOS-Einzelschaltzellen **50** in Spalten angeordnet, wobei jede zweite Spalte um eine halbe Zellenhöhe versetzt angeordnet ist. Bei richtiger Wahl der Zellenabmessungen ergibt dies ein vollkommen hexagonales Array von Anschlussinseln **66**, wie sie veranschaulicht sind. Die Durchkontaktierungen **56** (die ebenfalls in Form eines hexagonalen Arrays angeordnet sind) verbinden dann die jeweiligen (in [Fig. 4](#) nicht veranschaulichten) Anschlussinseln, die die Basis für Verbindungen zu der darüber liegenden Wandlerschicht bilden, die ein hexagonales Array von Subelementen aufweist. Eine etwas einfachere ASIC-Implementierung ist in [Fig. 7](#) veranschaulicht. Hier sind die CMOS-Einzelschaltzellen **50** in horizontalen Reihen und vertikalen Spalten angeordnet, um ein rechteckiges Gitter bzw. Raster zu bilden, während die hexagonalen Subelemente **32** über diesen ein hexagonales Gitter bzw. Raster bilden. Wie in [Fig. 7](#) veranschaulicht, sind die Anschlussinseln **66** der Einzelschaltzellen, die in Reihen und Spalten angeordnet sind, so dass sie ein rechteckiges Array bilden, weiterhin auf einer Linie richtig ausgerichtet, um die Verbindungen zu bilden, so dass die Einzelschaltzellen **50** mit jeweiligen hexagonalen Subelementen **32**

elektrisch verbunden sind. In jedem Fall ermöglicht das hexagonale Gittermuster der Subelemente, die Strahlmuster des mosaikartigen ringförmigen Arrays, wie in [Fig. 3](#) veranschaulicht, zu realisieren.

[0067] In typischem Betrieb wird das rekonfigurierbare Array mit einem anfänglichen Aperturmuster programmiert, das dem in [Fig. 3](#) veranschaulichten ähnlich ist. Dieses Muster ermöglicht dem Strahlformer, einen Strahl vor dem Array zu erzeugen. Bei einer Bildgebung wird die Apertur über dem Array **60** in der in [Fig. 8](#) veranschaulichten Weise gescannt, in der der Ring von dem Ring 1 bei $t = 1$ zu dem Ring 2 bei $t = 2$ und schließlich zu dem Ring N bei $t = N$ übergeht, wobei t die Zeit darstellt, während N eine positive ganze Zahl ist, die größer ist als 2. Auf diese Weise wird der Strahl in dem Raum vor dem Array gewobelt bzw. abgelenkt, während die strahlgeformten Echos verwendet werden, aufeinanderfolgende Linien des Bildes zu bilden. Das rekonfigurierbare Array hat den Zweck, den in [Fig. 8](#) veranschaulichten Bildgebungsvorgang elektronisch für ein willkürlich komplexes Arraymuster zu bewerkstelligen. Bisherige Ultraschallscanner sind in der Lage, ein elektronisches Scannen zu bewerkstelligen, sind jedoch aufgrund einer fehlenden feinen Verteilung von Sensorsubelementen in der Höhen- bzw. Elevationsrichtung und der festen Geometrie hinsichtlich der Komplexität der Apertur beschränkt.

[0068] Ein voll rekonfigurierbares Array, wie es in [Fig. 8](#) veranschaulicht ist, stellt bei der Implementierung viele wesentliche Herausforderungen bzw. Schwierigkeiten dar. Das Sensorarray ist in zehntausende Subelemente unterteilt. Strahlmuster werden gebildet, indem die Subelemente an ihren Verbindungen mit einer endlichen Anzahl von Sende/Empfangs- und Strahlformungskanälen des Systems gruppiert werden. Bei der Verwendung zur Realisierung des Konzeptes des mosaikartigen kreisringförmigen Arrays bildet das rekonfigurierbare Array mehrere Ringe, die in elektronischer Weise quer durch das Array verschoben werden. Bei jedem neuen Schritt der Verschiebung wird das gesamte Ringmuster in das Array neu einprogrammiert, um eine neue Konfiguration zu erzeugen. Es könnte auch die Möglichkeit bereitgestellt werden, Ringmuster zwischen dem Senden und dem Empfang sowie in mehreren Intervallen während des Empfangs zu aktualisieren, um die Verzerrung des geformten Strahls zu reduzieren und dadurch die Bildqualität zu verbessern.

[0069] In typischen Systemen werden 128 oder mehrere Strahlformungskanäle verwendet. Momentane Ultraschallsysteme verwenden Multiplexarchitekturen, die die 128 Systemkanäle zu einer festen Anzahl von Wandlerelementen leiten können. Unter Verwendung eines vernünftigen Entwurfs dieser Multiplexernetzwerke ist es möglich, ein standardgemäßes Scannmuster mit einer begrenzten Anzahl von

elektronischen Bauelementen zu erzeugen. In den meisten Fällen ist jedoch das Scannmuster festgelegt und aufgrund der Beschränkungen des Netzwerks nicht rekonfigurierbar. Ein vollständig rekonfigurierbares Array ist diesen Beschränkungen nicht unterworfen; jedoch erfordert es zu seiner Implementierung eine sehr dichte Schaltmatrix.

[0070] Wie in [Fig. 8](#) veranschaulicht, erfordert die grundlegende Beschaffenheit des rekonfigurierbaren Arrays, dass jedes beliebige Subelement willkürlich mit einem beliebigen Systemkanal verbunden werden kann. Wenn beispielsweise die Apertur von der ersten Stelle zu der nächsten Stelle gescannt wird, muss das Subelement S2 zuerst einen Teil eines (nicht veranschaulichten) inneren Ringes und anschließend einen Teil des Ringes 2 bilden. Dies bedeutet, dass es innerhalb einer kurzen Zeitspanne von einem an einen ersten Systemkanal angeschlossenen Zustand zu einem an einen anderen Systemkanal angeschlossenen Zustand umschalten muss. Dies gilt im Wesentlichen für eine große Anzahl von Subelementen in dem Array während eines Scannvorgangs.

[0071] Der einfachste Weg zur Verwirklichung dieser Anforderung besteht darin, sämtliche Systemkanäle über das Array hinweg derart zu verteilen, dass jedes Subelement einen Zugang zu jedem Systemkanal aufweist. Diese Architektur ist in [Fig. 9](#) veranschaulicht. Hier sind zu Veranschaulichungszwecken lediglich fünf Systemkanäle dargestellt. Jeder Systemkanal ist an einen durch jedes Subelement führenden Bus angeschlossen, wobei lokale Schalter verwendet werden, um auszuwählen, welcher Systemkanal durch welches Subelement erfasst wird.

[0072] In einem System, in dem die Matrixelektronik unmittelbar hinter dem Wandlerarray liegt, ist der freie Raum für die Schaltelektronik jedes Subelementes auf die Größe des Subelementes begrenzt. In gewöhnlichen Ultraschallsystemen liegt diese Größe in der Größenordnung einiger hundert Mikrometer, könnte jedoch kleiner als dieses sein. Da sich die Größe eines Schalters im umgekehrten Verhältnis zu seinem Durchlasswiderstand verändert, steht man vor einem Kompromiss: Mehr Schalter mit höherem Durchlasswiderstand oder weniger Schalter mit geringerem Durchlasswiderstand. Selbst wenn jedoch die Extremfälle berücksichtigt werden, in denen die Schalter so klein wie nur möglich ausgeführt sind, wird bald verständlich, dass mit den momentanen Halbleitertechnologien viel mehr als 16 Schalter nicht ohne weiteres in den zugewiesenen Raum passen können. Da die voll bestückte Architektur nach [Fig. 9](#) für ein echtes Array noch mehr Schalter enthalten wird, scheint es mit dem momentanen Stand der Technik schwer zu bewältigen sein.

[0073] Obwohl künftige Technologien es wohl prak-

tisch ermöglichen werden, viel mehr Schalter in demselben Raum zu integrieren, wird der Fortschritt beim Ultraschall dahingehen, die zugeteilte Zellengröße zu reduzieren, weil diese mit der Wellenlänge der Bildgebungseinrichtung in Beziehung steht, die zur Verbesserung der Bildqualität verringert werden muss. Außerdem werden viele weitere Komponenten, beispielsweise digitale Steuer- und Sende/Empfangsschaltungen in diesen gleichen begrenzten Bereich überführt. Deshalb ist die voll bestückte Architektur, obwohl sie angesichts ihrer Einfachheit attraktiv ist, nicht ohne weiteres haltbar oder sofort ausführbar.

[0074] Eine bessere Lösung zu dem vorstehend beschriebenen Verbindungsproblem besteht darin, die Anzahl von Schaltern in jedem Subelement zu reduzieren und dabei gleichzeitig die in einem rekonfigurierbaren Array erforderliche Flexibilität sicherzustellen. Dies kann unter Verwendung einer begrenzten Anzahl von Busleitungen und einer rekonfigurierbaren Einrichtung derselben bewerkstelligt werden, wie dies in [Fig. 10](#) veranschaulicht ist. Hier wird ein Multiplexer (MUX) **70** dazu verwendet, in willkürlicher Weise einen beliebigen der Systemkanäle **38** (K.1 bis K.N) zur Verbindung mit einer beliebigen der Busleitungen **74** auszuwählen, wobei jede Reihe der Subelemente **32** durch lediglich eine einzelne Busleitung bedient wird. Die cMUT-Zellen **2** jedes Subelementes (für jedes Subelement ist lediglich eine einzelne cMUT-Zelle veranschaulicht, sind mittels eines zugehörigen Zugangsschalters **30** mit einer Busleitung verbindbar. Ein Hauptmerkmal dieser Architektur liegt darin, dass viele der Schalter außerhalb des Arrays angeordnet und folglich von der Geometrie der Wandler unabhängig sind. Ein eindimensionales Muster kann quer durch das Array unter Verwendung dieser Architektur gescannt werden, indem in einer Aufeinanderfolge gewählt wird, welche Reihe von Subelementen mit welchem Systemkanal verbunden wird. Eine weitere Verbesserung bei dieser Architektur ist in [Fig. 11](#) veranschaulicht. Hier sind mehrere Busleitungen **74**, **76** entlang jeder Reihe von Subelementen **32** weitergeführt. Die cMUT-Zellen **2** jedes Subelementes **32** können entweder mit der Busleitung **74** über einen Zugangsschalter **30'** oder mit der Busleitung **76** über einen Zugangsschalter **30** verbunden werden. Diese Architektur stellt eine Flexibilität in der horizontalen Richtung bereit, weil es nun möglich ist, Elemente auf verschiedenen Systemkanälen innerhalb derselben Reihe gemeinsam zu gruppieren.

[0075] Eine weitere Verbesserung in Bezug auf die obige Architektur kann erzielt werden, wenn erkannt wird, dass die meisten Aperturen aus zusammenhängenden bzw. benachbarten gruppierten Subelementen bestehen, die miteinander verbunden sind, um ein einzelnes größeres Element zu bilden. In diesem Fall ist es nicht erforderlich, jedes Subelement unmittelbar an seine zugehörige Busleitung anzu-

schließen. Es genügt, eine begrenzte Anzahl von Subelementen in einer gegebenen Gruppe anzuschließen und anschließend die verbleibenden Subelemente miteinander zu verbinden. Auf diese Weise breitet sich das Sendesignal von dem System entlang der Busleitungen und in das Element über eine begrenzte Anzahl von Zugangspunkten hinein aus. Von da aus breitet sich das Signal in dem Element über lokale Verbindungen aus. Diese Architektur ist in [Fig. 12](#) veranschaulicht. Hier sind einzelne Subelemente **32** in der Lage, an die Busleitung, die jeder Reihe zugeordnet ist, mittels Zugangsschalter **30** angeschlossen zu werden und können mit der Busleitung, die einer benachbarten Reihe zugeordnet ist, mittels Matrixschalter **36** angeschlossen werden, die ein einzelnes Subelement mit einem benachbarten Subelement verbinden.

[0076] Eine Ausführungsform der Erfindung, die in [Fig. 13](#) veranschaulicht ist, bezieht alle der vorerwähnten Verbesserungen gemeinsam mit ein. Hier wird ein Zugangsschalter **30** dazu verwendet, ein gegebenes Subelement **32** mit einer Reihenbusleitung des Busses **34** zu verbinden. Diese Architektur ist unmittelbar auf ein mosaikartiges Ringarray anwendbar. In einer derartigen Vorrichtung können mehrere Ringe unter Verwendung der vorliegenden Architektur gebildet werden, wobei jeder Ring mit einem einzelnen Systemkanal unter Verwendung eines oder mehrerer Zugangsschalter verbunden ist, wobei jeder der Zugangsschalter mit einer Busleitung verbunden ist, die wiederum mit einem Systemkanal verbunden ist.

[0077] Die Zugangsschalter sind, wie in [Fig. 13](#) veranschaulicht, abgestuft bzw. versetzt angeordnet, um die für eine gegebene Anzahl von Busleitungen erforderliche Anzahl zu reduzieren, wie dies nachstehend erläutert ist. Es könnte auch eine nach dem Zufallsprinzip ausgewählte Zuordnung der Zugangsschalter zu den Busleitungen (nicht veranschaulicht) verwendet werden, um auf die sich wiederholenden Muster zurückzuführende Artefakte zu reduzieren. Es könnten mehr als nur ein einzelner Schalter in jedem Subelement verwendet werden, um die Flexibilität des Arrays zu verbessern. In einer derartigen Architektur würde ein Kompromiss zwischen der Flexibilität und der Anzahl von Zugangsschaltern pro Subelement erzielt werden, bei dem die Anzahl immer noch deutlich kleiner ist als die Anzahl von Busleitungen und Systemkanälen. Es ist auch möglich, mehr als nur einen einzelnen Zugangsschalter pro Busleitung in jedem Element zu verwenden. Dies würde die Ausbeute der Vorrichtung verbessern, weil nicht funktionierende Zugangsschalter unter Verwendung der redundanten Zugangsschalter überbrückt werden könnten.

[0078] Die Reihenbusleitungen sind mit den Systemkanälen unter Verwendung einer Kreuzungspunkt-Schaltmatrix verbunden, wie sie in [Fig. 13](#) ver-

anschaulicht ist. Es könnte auch ein dünn besetzter Kreuzungspunktschalter verwendet werden, bei dem weniger Multiplexerschalter erforderlich sein würden. Eine derartige Architektur wäre hinsichtlich der Nutzung von Raum effizienter, würde jedoch eine vernünftige Auswahl von Schaltkonfigurationen erfordern, um sicherzustellen, dass sämtliche Busleitungen in der richtigen Weise angeschlossen werden können. Wie in [Fig. 12](#) veranschaulicht, können mehrere Busleitungen pro Reihe verwendet werden. Mehrere Busleitungen verbessern die Flexibilität des Arrays auf Kosten mehrerer Multiplexerschalter und einer größeren Leitungsführungsfläche innerhalb des Arrays. Es ist möglich, Reihen auszulassen oder eine unterschiedliche Anzahl von Busleitungen in unterschiedlichen Reihen zu verwenden. Beispielsweise könnte es zur Flächenersparnis vorteilhaft sein, eine Gruppe von Busleitungen von jedem Paar einander benachbarter Reihen von Subelementen gemeinsam benutzen zu lassen.

[0079] Obwohl soweit nur horizontale Busleitungen beschrieben worden sind, ist es auch möglich, in einem Array sowohl vertikal als auch horizontal verlaufende Busleitungen anzuordnen. Busleitungen können in vertikaler Richtung angeordnet sein, wie dies in [Fig. 14](#) veranschaulicht ist (siehe Busleitungen **72**, **74**, **76**). Bezugnehmend auf [Fig. 15](#) könnte ein Satz von Busleitungen **82** in horizontaler Richtung angeordnet sein, während ein anderer Satz **84** in vertikaler Richtung angeordnet ist. In diesem Fall würde jedes Subelement oder jede Gruppe von Subelementen mit einer vertikalen Busleitung über einen Zugangsschalter verbindbar sein, und sie würde ferner mit einer horizontalen Busleitung über einen anderen Zugangsschalter verbunden werden können. Jedoch könnte in dem Fall, in dem Busleitungen in beiden Richtungen verlaufen jedoch, weil aber der für Busleitungen verfügbare echte Raum für die Elektronik eng wird und mehr Busleitungen erforderlich sind, jedoch weiterhin nur ein einzelner Zugangsschalter in einem Subelement vorhanden ist, der Zugangsschalter jedes Subelementes entweder mit der horizontalen Busleitung oder mit der vertikalen Busleitung und nicht mit beiden verbunden sein. Schließlich könnten Busleitungen auch in diagonaler Richtung angeordnet sein, wie dies in [Fig. 16](#) veranschaulicht ist. Diese Leitungen **76**, **80** verlaufen jeweils entlang von zwei der natürlichen Achsen des hexagonalen Arrays und würden folglich eine Adressierung der Subelemente vereinfachen.

[0080] Die Anzahl von Zugangsschaltern und Reihenbusleitungen ist durch die Größenbeschränkungen und die Anwendung bestimmt. Für die Zwecke der Beschreibung einer beispielhaften, den Schutzbereich in keiner Weise beschränkenden Implementierung (wie sie in [Fig. 13](#) veranschaulicht ist) werden ein einzelner Zugangsschalter **30** für jedes Subelement **32** und vier Reihenbusleitungen **34a–34d** für

jede Reihe des Elementes angenommen. Die zweite Schalterart ist ein Matrixschalter **36**, der verwendet wird, um einen Verbindungspunkt **42** eines einzelnen Subelementes (siehe [Fig. 17](#)) mit dem Verbindungspunkt eines benachbarten Subelementes zu verbinden. Dies ermöglicht einem akustischen Subelement, mit einem Systemkanal über die integrierte Elektronik, die einem benachbarten akustischen Subelement zugeordnet ist, verbunden zu werden. Dies bedeutet auch, dass ein akustisches Subelement mit einem Systemkanal verbunden werden kann, selbst wenn es nicht unmittelbar über einen Zugangsschalter angeschlossen ist. Während [Fig. 13](#) drei Matrixschalter pro Subelement veranschaulicht, ist es auch möglich, weniger als drei zu verwenden, um Fläche einzusparen, oder Schalter zu berücksichtigen, die einen kleineren Durchlasswiderstand aufweisen und folglich eine größere Fläche einnehmen. Außerdem können die Matrixschalter dazu verwendet werden, bei einem gegebenen Array die Leitungsstrecke um ein bekanntes schlechtes Subelement herum zu führen. Schließlich sind, obwohl hexagonale Subelemente veranschaulicht sind, auch rechteckige Subelemente möglich.

[0081] Bezugnehmend auf [Fig. 17](#) ist jedes der Subelemente mit einem gemeinsamen Verbindungspunkt **42** in der Elektronik verbunden, die dem akustischen Subelement **32** zugeordnet ist. Dieser gemeinsame Verbindungspunkt **42** schafft eine elektrische Verbindung für acht Komponenten in jedem Subelement. Der gemeinsame Verbindungspunkt **42** verbindet das akustische Subelement oder den Wandler **32** mit dem Zugangsschalter **30** für dieses Subelement, mit den drei Matrixschaltern **36**, die diesem Subelement zugeordnet sind, und mit den drei Matrixschaltern, die den drei benachbarten Subelementen zugeordnet sind, über Verbindungen **46**. Ein Signal, das einen Matrixschalter durchläuft, wird an den gemeinsamen Verbindungspunkt des benachbarten Subelementes angekoppelt.

[0082] [Fig. 13](#) veranschaulicht, in welcher Weise das Schaltnetzwerk für ein bestimmtes Subelement funktionieren kann. Dies ist lediglich eine beispielhafte Einrichtung. Ein Bus **34**, der vier Reihenbusleitungen **34a** bis **34d** enthält, verläuft abwärts durch die Reihe von Subelementen **32**. [Fig. 13](#) zeigt lediglich drei Subelemente in dieser Reihe, wobei es jedoch verständlich sein sollte, dass weitere Subelemente in dieser Reihe nicht veranschaulicht sind. Die Reihenbusleitungen des Busses **34** sind an dem Ende einer Reihe mittels Multiplexschalter **40**, die eine Kreuzungspunkt-Schaltmatrix bilden, im Multiplexbetrieb an Systemkanalbusleitungen des Systemkanalbusses **38** angeschlossen. Wie aus [Fig. 13](#) zu ersehen, kann jede Reihenbusleitung **34a**, **34d** mit einer beliebigen der Systemkanalbusleitungen des Busses **38** verbunden werden, indem der geeignete Multiplexschalter **40** eingeschaltet und die Multiplexschalter,

die die bestimmte Reihenbusleitung mit den anderen Systemkanalbusleitungen verbinden, ausgeschaltet werden. Diese Multiplexelektronik kann zu der Seite hin abgeschaltet werden und ist somit durch die Größe nicht so beschränkt. [Fig. 13](#) zeigt einen voll bestückten Kreuzungspunkt- bzw. Koppelpunktschalter. In Fällen, in denen es nicht erforderlich ist, Schalter zu haben, die es ermöglichen, jede Busleitung mit jedem Systemkanal zu verbinden, kann jedoch ein dünn bestückter Kreuzungspunktschalter verwendet werden, bei dem lediglich eine Untermenge von Systemkanälen mit einer gegebenen Busleitung verbunden werden kann, wobei in diesem Fall nur einige der in [Fig. 13](#) dargestellten Schalter **40** vorhanden sein würden.

[0083] Ein Zugangsschalter wird so bezeichnet, weil er einem Subelement einen unmittelbaren Zugang zu einer Busleitung verschafft. In der in [Fig. 13](#) veranschaulichten beispielhaften Implementierung sind sechs weitere Schaltverbindungen für jedes Subelement vorhanden. Diese Verbindungen nehmen die Form von Matrixschaltern **36** ein. Ein Matrixschalter ermöglicht einem Subelement, mit einem benachbarten Subelement verbunden zu werden. Während in diesem hexagonalen Muster sechs Verbindungen zu benachbarten Subelementen für jedes Subelement vorgesehen sind, befinden sich nur drei Schalter in jedem Subelement, während die anderen drei Verbindungen durch Schalter in den benachbarten Subelementen gesteuert sind. Somit gibt es eine Gesamtzahl von vier Schaltern und eine zugehörige digitale Logik in jedem Subelement. Dies stellt lediglich eine einzelne beispielhafte Realisierung dar. Die Anzahl von Busleitungen, die Anzahl von Zugangsschaltern und die Anzahl und Topologie der Matrixschalter können alle anders sein, obwohl das allgemeine Konzept gleich bleiben würde.

[0084] Obwohl die Zugangs- und Matrixschalter durch gesondert gepackte Komponenten gebildet sein können, ist es möglich, die Schalter in demselben Halbleitersubstrat, auf dem das MUT-Array gefertigt werden soll, zu erzeugen. Diese Schalter können Hochspannungs-Schalterschaltungen der Bauart aufweisen, wie sie in der US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10/248,968 und dem Titel „Integrated High-Voltage Switching Circuit for Ultrasound Transducer Array“ beschrieben ist. Jeder Schalter weist zwei DMOS FETs, die direkt hintereinander angeschlossen sind (Source-Knotenpunkte sind gemeinsam kurzgeschlossen), um einen bipolaren Betrieb zu ermöglichen. Strom fließt durch die Schalteranschlüsse, wenn beide FETs eingeschaltet sind. Die Zustände der Schalter sind durch zugehörige Schaltersteuerungsschaltkreise gesteuert. Die Zustände der Schaltkreise zur Schaltersteuerung sind wiederum durch Ausgänge von einer Programmierschaltung vorgegeben, die die Schaltersteuerungsschaltkreise gemäß einer optimierten Schalt-

konfiguration programmiert, die unter Verwendung des hier beschriebenen Algorithmus hergeleitet wird. Eine Scannsteuerungseinrichtung lädt die optimierte Schaltkonfiguration in die Programmierschaltung. Obwohl die Verwendung von CMOS-Hochspannungsschaltern eine bevorzugte Ausführungsform bildet, ist die hier beschriebene Erfindung unmittelbar auf andere Schalttechnologien, beispielsweise Niederspannungsschalter, MEMS-Schalter oder weitere künftige Schalttechnologien, die entwickelt werden, anwendbar.

[0085] [Fig. 18](#) zeigt ein akustisches Subelement **32**, das mit einem Zugangsschalter **30** über einen gemeinsamen Verbindungspunkt **42** verbunden ist. Die sechs weiteren Leitungen, die mit dem Verbindungspunkt **42** verbunden sind, sind nicht veranschaulicht. Bei diesem Beispiel weist der Zugangsschalter **30** das vorerwähnte Paar von hintereinander angeordneten DMOS FETs auf. Die Steuerungsschaltung **52** schaltet den Schalter **30** in Abhängigkeit von Steuerungssignalen, die durch die Programmierschaltung **54** gesandt werden, ein oder aus. Wenn der Zugangsschalter **30** eingeschaltet ist, ist das akustische Subelement **32** (d.h. ein Subarray von miteinander verbundenen cMUT-Zellen) mit der Reihenbusleitung **34a** verbunden. Für diese Konfiguration weist die jedem akustischen Subelement zugeordnete Elektronik einen einzelnen Zugangsschalter, drei Matrixschalter, eine jeweilige Steuerungsschaltung für jeden dieser vier Schalter und einen zugehörigen Leiter auf, der den gemeinsamen Verbindungspunkt mit den Matrixschaltern der drei benachbarten Subelemente verbindet (nicht veranschaulicht).

[0086] Das Signal, das von dem Subelement zu der Reihenbusleitung läuft, ist das elektrische Empfangssignal. Hier ist das Empfangssignal die elektrische Antwort oder Reaktion, die durch das akustische Subelement erzeugt wird, wenn eine Schalldruckwelle mit dem Wandler wechselwirkt. Das Sendesignal, bei dem ein elektrischer Impuls durch das Ultraschallsystem erzeugt wird, läuft von der Reihenbusleitung zu dem Matrixschalter. Bei einem gegebenen Kanal läuft dieser elektrische Anregungsimpuls über eine Systemkanalbusleitung zu einer Reihenbusleitung. Das Signal läuft von der Reihenbusleitung zu dem akustischen Subelement über einen Zugangsschalter und läuft ferner zu weiteren Subelementen über die Matrixschalter.

[0087] Die Anzahl von Schaltern, die hinter einem akustischen Subelement passen, ist begrenzt. Die Größe des Schalters bestimmt den Durchlasswiderstand des Schalters, so dass je kleiner der Schalter ist, desto größer der Durchlasswiderstand ist. Die durch das Schalten herbeigeführte Verzögerung und Verzerrung steigt, wenn der Durchlasswiderstand des Schalters größer wird. Dies bedeutet, dass es eine Wechselbeziehung zwischen der Anzahl von

Schaltern hinter einem akustischen Subelement und der durch diese Schalter herbeigeführten Verzögerung gibt. Eine Lösung zu dieser Wechselbeziehung umfasst eine Reduktion der Anzahl von Schaltern auf eine kleine Anzahl unter Aufrechterhaltung einer so großen Flexibilität wie nur möglich. Diese Reduktion wird unter Verwendung von Matrixschaltern, die akustischen Subelementen ermöglichen, durch andere Subelemente hindurch an einen Systemkanal angeschlossen zu werden, sowie durch eine Begrenzung der Anzahl von Zugangsschaltern auf eine kleine Anzahl erreicht.

[0088] Die Busleitungen, die die Zugangsschalter mit den Systemkanälen verbinden, nehmen ebenfalls Raum in der Elektronikschicht ein, so dass eine Minimierung der Anzahl von Busleitungen ebenfalls von Vorteil ist. Die Anzahl von einzelnen Kanälen, die unmittelbar mit akustischen Subelementen in der gleichen Reihe verbunden werden können, ist durch die Anzahl von Busleitungen bestimmt. Da jedoch die Matrixschalter Subelementen in einer einzelnen Reihe ermöglichen, mit Subelementen in anderen Reihen verbunden zu werden, wird die Anzahl von Kanälen in einer Reihe durch die Matrixschalter erhöht. Dies ermöglicht es, die Anzahl von Busleitungen klein zu halten, während weiterhin eine große Anzahl von Kanälen bedient wird. Natürlich steigern mehrere Busleitungen die Flexibilität, benötigen jedoch mehr Platz.

[0089] Die Verwendung der Matrixschalter bedeutet, dass die Anzahl von Zugangsschaltern hinter jedem Subelement reduziert werden kann. In dem äußersten Fall ist lediglich ein einzelner Zugangsschalter für jedes Subelement vorhanden. Falls jedoch mehr als eine einzige Busleitung vorgesehen sind, muss eine Festlegung erfolgen, an welche Busleitung jeder Zugangsschalter angeschlossen sein sollte. Eine Lösung besteht darin, die Verbindungen derart abgestuft bzw. versetzt anzuordnen, dass die angeschlossene Busleitung sich alle N Subelemente in einer Reihe wiederholt, wobei N eine Zahl darstellt, die durch das Erfordernis nach einer minimalen Signalverzerrung bestimmt ist, wie dies nachstehend erläutert ist. Bezugnehmend auf [Fig. 13](#) ist jedes Subelement **32** in der Reihe mit einer der Reihenbusleitungen in dem Reihenbus **34** über einen zugehörigen Zugangsschalter **30** verbunden. Dieses Muster von abgestuften bzw. versetzten Verbindungen wiederholt sich alle vier Subelemente. Die Abstufung ermöglicht mehr Busleitungen bei weniger Zugangsschaltern und ermöglicht ferner in Kombination mit den Matrixschaltern eine größere Flexibilität dahingehend, welche Systemkanäle mit jedem Subelement verbunden werden können. Natürlich erhöht eine Einrichtung mit mehr als nur einem einzelnen Zugangsschalter pro Zelle die Flexibilität der Verbindungen, erfordert jedoch kleinere Schalter mit höherem Durchlasswiderstand.

[0090] Im Allgemeinen ist die Anzahl von Reihen N , nach der sich das Muster wiederholt, durch die maximale Anzahl von Matrixschaltern bestimmt, die bei weiterer Aufrechterhaltung einer adäquaten Signalintegrität aneinandergereiht werden können. Diese Anzahl erklärt sich aus dem Verständnis heraus, dass der Widerstand des Matrixschalters und die cMUT-Kapazitäten gemeinsam eine RC-Verzögerungsleitung mit einer Verzögerungszeitkonstante bilden, die mit der Anzahl von in Reihe hintereinander geschalteten Abgriffen oder Stufen N exponentiell variiert. Dieses Konzept ist nachstehend weiter erläutert. Eine versetzte Anordnung oder Staffelung der Zugangsschalter an mehreren Reihenbusleitungen ermöglicht eine Erhöhung der Anzahl von Elementen, die bei der gegebenen Beschränkung hinsichtlich der Verzögerungsleitung unterstützt werden können. Wie in [Fig. 19](#) veranschaulicht, tritt der ungünstigste Fall für den Entwurf auf, wenn Ringe (von denen Abschnitte durch gestrichelte Bögen angezeigt sind) mit einer Einzelsubelementweite eng aneinander gepackt werden. Die vertikalen Abschnitte des Rings ergeben den ungünstigsten Fall, weil Busleitungen **74**, **76** in dieser Ausgestaltung horizontal verlaufen. In den horizontalen Abschnitten der Ringe könnte einfach ein einzelner Zugangsschalter an jedem Subelement verwendet werden, weil sie alle die gleichen sein würden, da die Busleitungen parallel zu den Ringen verlaufen. In den vertikalen Abschnitten ist jedoch jede Reihe von Subelementen **32** einer anderen Busleitung zugeordnet, die mit einem anderen Systemkanal verbunden ist. Folglich können Subelemente, die in diesem Bereich in vertikaler Richtung voneinander beabstandet sind, nur unter Verwendung der durch Bindestriche dargestellten Matrixschalter **36** unterstützt werden. In [Fig. 19](#) sind zwei Busleitungen pro Reihe vorgesehen, und das Muster der (durch Punkte gekennzeichneten) Zugangsschalter **30** wiederholt sich jeweils nach vier Reihen. Bei jeder Reihe werden zwei Ringe durch die beiden Zugangsschalter und ihre zugehörige Kette von mit Matrixschaltern gruppierten Subelementen unterstützt. Da sich das Muster nach vier Reihen wiederholt, unterstützt diese besondere Architektur eine Maximalzahl von $2 \times 4 = 8$ Ringen. Im Allgemeinen kann für ein Array mit M Busleitungen auf jeder Reihe und N Abgriffen oder Stufen für jede Kette von Subelementen eine Maximalzahl von K Systemkanälen unterstützt werden, wobei $K = M \times N$. Natürlich sind die meisten Abschnitte der Ringe weder vollkommen horizontal noch vollkommen vertikal angeordnet. Deshalb besteht die Aufgabe für den Systementwickler darin, die Arraykonfiguration in allen Punkten in der Apertur unter den Randbedingungen der Architektur zu optimieren.

[0091] Bei einem gegebenen bestimmten gewünschten Mapping zwischen Subelementen und Systemkanälen ist es das Ziel, die optimale Schaltungskonfiguration zu bestimmen, die dieses

Mapping ergibt oder nahezu ergibt. Es kann gegebenenfalls keine Konfiguration geben, die mit dem gewünschten Mapping exakt übereinstimmt. Dies hängt von der Flexibilität des gegebenen Aufbaus ab, die durch die Anzahl von Busleitungen und die Anzahl von Zugangsschaltern beeinflusst ist. In dem Fall, in dem das gewünschte Mapping nicht erzeugt werden kann, muss eine nahe Approximation gewählt werden. Für die mosaikartige ringförmige Variante der Rekonfigurierbarkeit ist die wahrscheinlichere Situation diejenige, dass sich mehrere Konfigurationen ergeben, die das gewünschte Subelement-zu-Kanal-Mapping ergeben. Es können auch mehrere Näherungskonfigurationen für den Fall gegeben sein, in dem das gewünschte Mapping nicht exakt erzeugt werden kann. In diesen Fällen, in denen mehrere Konfigurationen das gleiche Subelement-zu-Systemkanal-Mapping ergeben, kann eine einzelne Konfiguration im Hinblick auf das Verzögerungs- und Amplitudenverhalten mehr erwünscht sein. Ein Aspekt der hier dargebotenen Erfindung umfasst die Verwendung von Optimierungsprozeduren zur Verbesserung des Verhaltens des Bildgebungssystems durch Auswahl einer Konfiguration mit einem besseren Verhalten.

[0092] Die Verbindungen zwischen einem Systemkanal und einem gegebenen Subelement können kompliziert sein. Eine Schaltnetzwerkkonfiguration definiert ein komplexes Netz von Verbindungen zwischen Subelementen und Systemkanälen. Das Ergebnis ist, dass es nicht eine einfache Verbindung von einem Subelement zu einem Systemkanal, sondern eher eine Verbindung durch eine Folge von Schaltern (sowohl Zugangs- als auch Matrixschaltern) gibt, die eine komplexe Verzögerungsleitungsstruktur bilden. Beim Senden sollten die an den gleichen Systemkanal angeschlossenen Signale den gleichen Sendeimpuls synchron erblicken. In der Realität verzögert jedoch das Netzwerk von Schaltern die Signale und verändert die Amplitude und Form des Impulses an jedem Subelement, der einen anderen Pfad zu dem Systemsender erblickt.

[0093] Einfache Berechnungen der Verzögerungsleitungen können dazu verwendet werden, eine Vorstellung darüber zu erhalten, wie viel Zeitverzögerung vorhanden sein wird und wie die Impulse verzerrt werden. Das Wandlerarray und seine zugehörige Schaltmatrix können in Form eines verteilten Netzwerks von Widerständen und Kondensatoren modelliert werden. Signale breiten sich durch dieses Netzwerk mit einer Verzögerungszeit aus, die mit dem Einheitswiderstand und der Einheitskapazität des Netzwerks in Beziehung steht. Ein einfaches Beispiel für ein derartiges Netzwerk bildet eine eindimensionale RC-Verzögerungsleitung, wie sie in [Fig. 20](#) veranschaulicht ist. In diesem Netzwerk erfahren sich von dem Eingang aus ausbreitende Signale eine Verzögerung, die eine Funktion des Wider-

stands R und der Kapazität C , wie veranschaulicht, ist. An jedem Knotenpunkt oder an jeder Anzapfung bzw. Stufe in dem Netzwerk ist die Signalform anders geformt, weil sie ein anderes Maß an Verzögerung in Bezug auf das Eingangssignal erfahren hat. Es kann gezeigt werden, dass die Verzögerung im ungünstigsten Fall in einer endlichen RC-Verzögerungsleitung mit $RCN^2/2$ variiert, wobei N die Anzahl von Anzapfungen bzw. Stufen in der Verzögerungsleitung darstellt. [Fig. 21](#) zeigt Messdaten für eine RC-Verzögerungsleitung mit 20 Anzapfungen bzw. Stufen, die dem in [Fig. 20](#) veranschaulichten Netzwerk ähnlich ist. Das Diagramm zeigt eine Schar von Kurven, die an jeder Zapfstelle bzw. Stufe der Verzögerungsleitung gemessen worden sind, wobei die Stufenzahl von links nach rechts steigt. Dieses Diagramm zeigt deutlich die Verzerrung der Spannungssignalformen, wenn sich diese durch das Netzwerk fortpflanzen. Es ist ersichtlich, dass die (als die Zeitdauer von dem Stufeneingang bis zu dem Mittelpunkt des Ausgangs definierte) Verzögerung im ungünstigsten Fall durch $RCN^2/2$ angenähert werden kann, was in diesem Versuch ungefähr 25 Mikrosekunden beträgt. Folglich ist eine gute Faustregel für den Entwurf eines rekonfigurierbaren Ultraschallarrays, die Wandlerkapazität und den Schalterdurchlasswiderstand derart zu entwerfen, dass $RCN^2/2$ stets kleiner ist als die im ungünstigsten Fall anzunehmende Verzögerung, die in dem System zugelassen werden kann. In diesem Fall ist die Anzahl von Anzapfungen bzw. Stufen (oder Schaltern) N , die in einem beliebigen gegebenen Pfad zugelassen wird, durch die Bildgebungsanforderungen des Systems und die RC-Zeitkonstante des Netzwerks begrenzt.

[0094] Die vorstehend erläuterten Ergebnisse zeigen, dass die Verzögerung an einem bestimmten Subelement davon abhängig ist, durch wie viele Schalter das Signal passieren muss, wie viele Pfade das Signal durchlaufen muss und wie die mehreren Verbindungen verteilt sind. Es kann erwartet werden, dass in Abhängigkeit von der bestimmten Appertur, die verwendet wird, unterschiedliche Verzögerungsmuster festgestellt werden. Außerdem kann durch Simulation und sukzessive Approximation zu einer für eine reduzierte Verzögerung verbesserten Anordnung der Zugangsschalter gelangt werden. [Fig. 22](#) veranschaulicht, in welcher Weise sich die Verzögerung mit der Elementtopologie verändert. In diesem Beispiel repräsentiert das Element **86** einen Treiber, während der Rest der Figur eine Reihe von Subelementen **32** veranschaulicht, die durch jeweilige Matrixschalter **36** in Reihe miteinander verbunden sind (um ein lineares Element zu bilden). In erster Ordnung kann man sich die Ausbreitung von Signalen in einer Verzögerungsleitung als eine Diffusion von Wärme von punktwärmigen Wärmequellen vorstellen. Unter Beachtung dieser Analogie zeigt [Fig. 22](#), dass die Verzögerung und Abschwächung oder Dämpfung in zwei Dimensionen steigen, wenn der

Abstand oder die Distanz von den Treibknotenpunkten oder Zugangsschaltern **30** zunimmt.

[0095] Es ist offensichtlich, dass zur Reduktion der Signalverzerrung für jedes Subelement in der Appertur es am besten ist, die Zugangsschalter so gleichmäßig wie möglich und so dicht wie möglich zu verteilen. Insbesondere können die Schalter konfiguriert werden um sicherzustellen, dass jeweils unterschiedliche Zugangsschalter **30** vorhanden sind, die jeweils an einem der beiden Enden einer langen Folge von Matrixschalterverbindungen angeschlossen sind, wie dies in [Fig. 23](#) veranschaulicht ist. Bei einem linearen Element, wie veranschaulicht, kann eine deutliche Verbesserung erzielt werden, indem Zugangsschalter **30** an beiden Enden des linearen Elementes platziert werden, insbesondere wenn alle diese Subelemente durch Matrixschalter entlang des linearen Elementes miteinander verbunden sind, so dass ein kontinuierlicher Pfad von einem Ende des linearen Elementes zu dem anderen Ende vorliegt. Die durch den Anschluss beider Enden des kontinuierlich verbundenen linearen Elementes erzielte Verbesserung ist größer als die Verbesserung, die durch Aufteilung desselben Elementes in zwei kürzere Elemente, von denen jedes seine eigene Zugangsschalterverbindung aufweist, erzielt werden würde. Eine noch weitere Verbesserung ergibt sich, wenn die Zugangsschalter **30** in dem Element verteilt angeordnet sind, wie dies in [Fig. 24](#) veranschaulicht ist.

[0096] In dem Fall eines Ringarrays, würde die einfachste Architektur der in [Fig. 25](#) veranschaulichten entsprechen. Hier ist ein einzelner Zugangsschalter **30** mit einem gesamten Ring von Subelementen verbunden (einzelne Subelemente sind nicht veranschaulicht), wobei alle Subelemente wiederum durch (nicht veranschaulichte) Matrixschalter gemeinsam verbunden sind. Während diese Architektur einfach zu implementieren ist, weil sie lediglich einen einzelnen Zugangsschalter erfordert, führt diese Architektur eine wesentliche Verzögerung ein, die von der Größe der Matrixschalter abhängig ist. Folglich können mehrere Zugangsschalter an einen gesamten Ring angeschlossen sein, wie dies in [Fig. 26](#) veranschaulicht ist, wobei Matrixschalter zwischen (nicht veranschaulichten) Subelementen Zugangsschalter **30** aufweisen, um jeweilige Abschnitte des Rings zu bilden. Diese Zugangsschalter würden in gleichen Abständen zueinander verteilt um den Ring herum beabstandet angeordnet sein, um die Signalverzögerung für diese Subelemente zwischen den Schaltern zu reduzieren. Auf diese Weise können mehrere redundante Matrixschalterverbindungen verwendet werden, um einen einzelnen Ring zu bilden, um den Serienwiderstand zu reduzieren und dadurch die Verzögerung zu verringern. Wie in [Fig. 27](#) veranschaulicht, können Zugangsschalter derart gewählt sein, dass sie in gleichem Abstand zu jedem Rand eines Rings liegen, um die Verzögerung innerhalb des Rings auf

ein Minimum zu reduzieren, wenn lediglich ein einzelner Zugangsschalter verwendet wird. Der Rand des Rings bezieht sich auf das Subelement in der Nähe der inneren und der äußeren Umfangsbegrenzung des Rings. Auf diese Weise wird das Verzögerungsmuster innerhalb des Rings verbessert. Wenn mehrere Zugangsschalter über die Weite eines Rings hinweg eingesetzt werden, sollten diese an dem inneren und äußeren Rand bzw. Umfang des Rings platziert werden, um das Verzögerungsmuster durch Minimierung des zweidimensionalen Schalterabstands zu verbessern. [Fig. 28](#) zeigt einen derartigen Fall. Die von Kreisen umgebenen Punkte **30** repräsentieren Zugangsschalter, die paarweise in der Nähe des inneren und des äußeren Umfangsrandes jedes Rings von Subelementen angeordnet sind (wobei einzelne Subelemente nicht veranschaulicht sind). Bei an den Rändern des Rings angeordneten Zugangsschaltern **30** wird das Signal von beiden Richtungen aus getrieben, und der gesamte Fehler wird reduziert. [Fig. 28](#) zeigt ferner Zugangsschalter **30'**, die innerhalb von Quadraten dargestellt und in dem Zentrum des Rings (d.h. in der Mitte zwischen dem inneren und dem äußeren Umfangsrand des Rings) positioniert sind. Dies führt zu größeren Fehlern an dem Rand der Ringe, weil die Zugangsschalter den Ring nicht von beiden Rändern aus treiben.

[0097] Während die vorliegende Architektur auf das Konzept des mosaikartigen Ringarrays abzielt, sollte es für einen Fachmann auf dem Gebiet klar sein, dass andere Muster als Ringe gebildet werden können, während die Zugangsschalterpositionierung weiterhin gewählt werden kann, um die Verzögerung zu minimieren. Folglich ist die hier beschriebene Erfindung auf andere Bildgebungsarten, einschließlich Phased-Array-Anordnungen, linearen und zweidimensionalen Arrays, unmittelbar anwendbar.

[0098] Das Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung kann verwendet werden, um die Schaltkonfiguration zu wählen, die die durch das komplexe Schaltnetzwerk eingeführten Fehler auf ein Minimum reduziert. Das Ziel besteht darin, den Fehler in einer derartigen Weise zu reduzieren, dass die Strahlformung am wenigsten beeinträchtigt wird. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, um dies zu erreichen. Einige speziellere Implementierungen von Algorithmen, die dieses Ziel zu erreichen versuchen, sind nachstehend angegeben. Diese Implementierungen sollten nicht in einem die Erfindung beschränkenden Sinne, sondern als Beispiele aufgefasst werden, die verwendet werden, um das Leistungsvermögen derartiger Algorithmen zu veranschaulichen.

[0099] Wenn beispielsweise ein vollständiges Modell des Systems zur Verfügung steht, kann das Modell anschließend dazu verwendet werden, die beste Konfiguration für das Schaltnetzwerk zu bestimmen. Dies könnte erreicht werden, indem eine Schaltkonfi-

guration durch einen auf Zufallsprinzip oder teilweise auf Zufallsprinzip beruhenden Prozess erzeugt wird. Die Schaltkonfiguration ist dann der Eingang bzw. die Eingabe für das Modell. Das Modell berechnet die Antwort des Systems unter Berücksichtigung aller der Schaltnetzwerkfehler. Unter Verwendung des Modells kann dann eine Form eines Bildes oder Strahlungsmusters erzeugt werden, und auf der Basis dieser Daten werden anschließend bestimmte Kriterien oder Kostenfunktionen berechnet. Das Ergebnis der Kostenfunktion wird verwendet, um die Konfiguration zu modifizieren. Anschließend wird ein iterativer Algorithmus ausgelöst, wobei Simulated Annealing oder irgendein sonstiges Rechenverfahren dazu verwendet wird, die Kostenfunktion zu minimieren zu versuchen und diese zu minimieren.

[0100] Die Parameter, die berechnet werden, hängen von der Komplexität des Modells, das gewählt worden ist, und der spezifischen Kostenfunktion ab, die gewählt wird, um minimiert zu werden. Ein genaues Modell wäre in der Lage, die akustische Ausgabe (Druck in Abhängigkeit von Raum und Zeit) an der Stirnfläche des Wandlers bei einer gegebenen besonderen Schaltkonfiguration und Eingangsanregung zu berechnen. Ein derartiges Modell würde es erfordern, die Auswirkungen des Schaltnetzwerks und die Antwort der einzelnen Wandlerzellen einzuschließen. Bei einer gegebenen akustischen Ausgabe kann es viele Kostenfunktionen geben, die dann ausgewertet werden könnten. Beispielsweise könnte die Strahlweite des resultierenden Strahlungsmusters unter gleichzeitiger Minimierung der Nebenkeulenwerte des Musters minimiert werden. In diesem Fall müsste das Modell die Strahlweite und die Nebenkeulen berechnen.

[0101] Alternativ könnte dieser Optimierungsprozess, wenn die Hardware verfügbar ist, unter Verwendung der tatsächlichen Hardware durchgeführt werden. In diesem Fall würden die Konfigurationen erzeugt und auf die Systemsteuerung angewandt werden. Ein Bild würde erzeugt werden, oder es würden vereinfachte Daten entnommen werden. Erneut würde eine Kostenfunktion auf diese Daten gestützt und dazu verwendet werden, die Konfiguration zu modifizieren. In diesem Fall ist jedoch keine Modellierung mit umfasst. Man könnte auch das Verhalten durch Messen von Spannungen unmittelbar an der zugrundeliegenden CMOS-Elektronik unter Verwendung eines Sondenarrays auswerten, das entworfen ist, um zu dem Schaltarray zu passen. Hier begrenzen die Geschwindigkeit, mit der das Schaltnetzwerk programmiert werden kann, und die Geschwindigkeit, mit der Daten erfasst und verarbeitet werden können, die Anzahl von Konfigurationen, die untersucht werden können. Jedoch ist diese Anzahl wahrscheinlich recht groß, so dass dies einen guten Weg zur Bestimmung der tatsächlichen Antwort ohne Erzeugung eines Bildes darstellen könnte.

[0102] In einigen Fällen gestaltet sich die vollständige Modellierung der akustischen Antwort des Systems, einschließlich sämtlicher Schalttopologiefehler, schwierig und ist rechenintensiv. Ferner kann ein Arbeitsprototyp in Hardware zur Verwendung bei der Erfassung von Daten an den Konfigurationen nicht verfügbar sein. Selbst wenn die Hardware verfügbar wäre, wäre die zur Erfassung und Verarbeitung der Daten für viele Konfigurationen erforderliche Zeitdauer sehr groß. So kann zur Bestimmung der Effektivität der Verwendung dieser Art von Algorithmus ein einfacheres Modell, das auf der Intuition und dem Verständnis darüber, wie das Netzwerk die akustische Antwort beeinflussen könnte, basiert, verwendet werden, das es ermöglicht, sehr schnell viele Konfigurationen auszuwerten. Beispielsweise ist es bekannt, dass, je größer die Anzahl von Schaltern ist, die die Signale durchlaufen müssen, desto größer ist auch die Verzögerung und Verzerrung, die herbeigeführt wird.

[0103] Es stellt sich heraus, dass in erster Ordnung ein guter Weg, eine Einrichtung des Schaltnetzwerks zu versuchen und zu bewerkstelligen, derjenige ist, bei dem der Abstand oder die Distanz zwischen einer Verbindung und einem Subelement so klein wie möglich ist. Hier ist eine Verbindung als ein Zugangsschalter definiert, der an ist und somit das Subelement mit dem Schalter unmittelbar mit der Reihenbusleitung für einen bestimmten Kanal verbindet. Und der Abstand oder die Distanz bezieht sich auf die Anzahl von Schaltern, die ein Signal durchlaufen muss, um von dem akustischen Subelement zu der Reihenbusleitung zu gelangen. Außerdem sollten die angeschlossenen Zugangsschalter weit möglichst verstreut sein, um einen lokalen kurzen Abstand auf Kosten sehr langer Serien für einige Subelemente zu vermeiden. So verwendet das vereinfachte Modell die Anzahl von Matrixschaltern, die ein Signal durchlaufen muss, als eine Metrik für das Leistungsverhalten der Konfiguration. Obwohl dies nicht ganz richtig ist, hat sich bei der Simulation gezeigt, dass dieses einfache Modell das Leistungsverhalten des Schaltnetzwerks verbessert. Dies trotz der Tatsache, dass ein zweidimensionales Phänomen mit einer eindimensionalen Metrik modelliert wird.

[0104] Für die besondere Implementierung der Rekonfigurierbarkeit, wie sie hier beschrieben ist, gibt es durch die Elektronik auferlegte Beschränkungen. Es gibt einen Satz von Regeln, die die Schaltkonfigurationen für ein System beeinflussen. Zusätzlich zu den harten Regeln gibt es auch Richtlinien, wie beispielsweise eine Reduktion des Abstandes zwischen einem akustischen Subelement und einem Verbindungspunkt. Die Regeln müssen befolgt und die Richtlinien können verwendet werden, um das Leistungsverhalten zu verbessern. Die Regeln sind wie folgt:

[1] Jede Reihe weist „n“ Reihenbusleitungen auf.

Für das hier beschriebene Beispiel ist $n = 4$. Dies bedeutet, dass für die gesamte Reihe nur vier Systemkanalbusleitungen vorhanden sind, an die die Zugangsschalter angeschlossen werden können.

[2] Jedes Subelement in der Reihe ist an lediglich eine der n Reihenbusleitungen angeschlossen. Dies rührt von der Tatsache her, dass es nur einen einzelnen Zugangsschalter in dem Subelement gibt. Dies bedeutet auch, dass ein gegebenes Subelement nur an einen einzelnen Systemkanal unmittelbar angeschlossen werden kann, wobei dieser Kanal durch den Multiplexer zwischen den Systemkanalbusleitungen und den Reihenbusleitungen bestimmt wird.

[3] Jede Reihenbusleitung ist mit einer einzelnen Systemkanalbusleitung verbunden. Während die Systemkanalbusleitungen mit den Reihenbusleitungen gemultiplext werden, kann diese Verbindung für eine gegebene Konfiguration nicht verändert werden.

[4] Das Muster, nach dem eine Reihenbusleitung mit einem gegebenen Zugangsschalter verbunden ist, wiederholt sich über die Reihe hinweg. Für den hier beschriebenen Fall wiederholt sich das Muster alle vier Subelemente.

[5] Für eine gegebene Schaltungsimplementierung ist die Gesamtzahl von Zugangsschaltern, die mit derselben Reihenbusleitung verbunden sind, eine kleine endliche Zahl. In dem besonderen Fall, wie er nachstehend in dieser Offenbarung beschrieben ist, beträgt der Grenzwert 4. Dies rührt von den Stromentnahmebeschränkungen her, die durch die begrenzte Größe der Reihenbusleitungen auferlegt werden. Die Grenze basiert auf Simulationen und kann durch Steigerung der Größe der Reihenbusleitungen vergrößert werden, wodurch größere Stromentnahmen ermöglicht werden, wobei dies jedoch größere Subelemente erfordern kann.

[0105] Die Leitsätze oder Richtlinien sind vorstehend erwähnt worden, sind jedoch nachstehend konkreter beschrieben. Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist es das Ziel, den durch das Schaltnetzwerk eingebrachten Verzögerungsfehler auf ein Minimum zu reduzieren. Dies kann bewerkstelligt werden, indem der Abstand oder die Distanz von einem Verbindungspunkt zu einem Subelement so klein wie möglich gehalten wird. In diesem Kontext ist ein Verbindungspunkt ein Subelement, in dem der Zugangsschalter eingeschaltet ist. Außerdem ist es besser, eine gleichmäßige Verteilung der Verbindungspunkte zu erzielen.

[0106] Eine Bestimmung der Schaltnetzwerkkonfiguration bedingt eine Bestimmung, welche Zugangsschalter an sind und in welcher Weise der Multiplexer (d.h. das Feld von Multiplexerschaltern **40**, wie sie teilweise in [Fig. 13](#) dargestellt sind) zwischen den

Reihenbusleitungen und den Systemkanalbusleitungen festgelegt ist. Die Zustände der Matrixschalter sind einfach zu ermitteln, wenn das gewünschte Muster bekannt ist. Die Matrixschalter werden eingestellt, indem einfach bestimmt wird, ob das benachbarte Subelement, an den der Schalter angeschlossen ist, auf dem gleichen Systemkanal sein sollte oder nicht. So ist die Arbeit dadurch bestimmt, in welcher Weise Systemkanäle mit den gemultiplexten Reihenbusleitungen zu verbinden sind. Wenn dies bekannt ist, gestaltet sich eine Zuordnung der Zugangsschalter ebenfalls einfach.

[0107] Eine Bestimmung einer optimalen Schaltkonfiguration ist schwieriger. Um zu beginnen, ist ein einfacher algorithmischer Lösungsansatz zur Zuordnung von Schaltern entwickelt worden. Der Algorithmus ist unter Beachtung einiger der Regeln und Richtlinien entworfen worden, stellt jedoch keinesfalls eine optimale Lösung, vielmehr gerade eine Lösung dar, die als Referenz dienen kann. Die angedachte Lösung basiert auf der speziell gewünschten Konfiguration. In einem Beispiel war die gewünschte Konfiguration ein Ringarray mit zwanzig Ringen gleicher Weite. Der Algorithmus ist wie folgt: Beginnend an einem Rand des Arrays gehe von einer Reihe zur nächsten Reihe in dem Array vor. Für jede Reihe und für jede Busleitung auf dieser Reihe:

[1] Bestimme, welche Ringe (d.h. welche Systemkanäle) für die gegebene Reihenbusleitung möglich sind. Beispielsweise kann in der Nähe der oberen Seite des Arrays nur das äußere Element vorhanden sein. In diesem Fall ist nur der einzelne Ring möglich. Wenn man sich zu dem Zentrum hin bewegt, sind alle Ringe vorhanden, wobei jedoch für eine gegebene Reihenbusleitung nur einige der Ringe möglich sein werden.

[2] Für jeden Ring bestimme, wie viele Zugangsschalter für die gegebene Reihenbusleitung eingeschaltet werden könnten, wenn der Multiplexer diese Reihenbusleitung auf den Systemkanal einrichtet, der diesem Ring entspricht.

[3] Weise die Reihenbusleitung dem Ring zu, der es ermöglichen würde, dass die meisten Zugangsschalter an sind. Dies sollte jedoch unter den folgenden Randbedingungen bewerkstelligt werden:

[a] derselbe Ring kann nicht mehr als einer einzelnen Busleitung in einer Reihe zugewiesen sein; und

[b] derselbe Ring kann nicht der Reihenbusleitung zugewiesen werden, wenn er bereits in den letzten vier Reihen dieser zugewiesen worden ist.

[0108] In einigen Fällen ist es nicht möglich, die Bedingung [b] zu erfüllen und dennoch einen Ring der speziellen Reihenbusleitung zuzuordnen. Wenn beispielsweise nur drei Ringe Kandidaten bilden, die einer bestimmten Reihenbusleitung zugeordnet werden können, diese drei Ringe jedoch gerade den vor-

herigen drei Reihenbusleitungen zugeordnet worden sind, wird es keinen Ring geben, der dieser bestimmten Reihenbusleitung zugeordnet werden kann. In diesem Fall und in allen Fällen, in denen die Bedingung [b] eine Reihenbusleitung daran hindert, mit irgendeinem Ring verbunden zu werden, muss diese Grenzbedingung beseitigt bzw. gemildert werden. Für diesen Algorithmus können die Beschränkungen in einer Weise beseitigt bzw. gemildert werden, die die Absicht des Algorithmus in geringstem Maße stört. So soll, falls die Bedingung [b] nicht erfüllt werden kann, die Beschränkung hinsichtlich der Reihen beginnend mit der weitesten Reihe eine nach der anderen reduziert werden. Falls beispielsweise [b] nicht erfüllt werden kann, soll eine derartige Reihenbusleitungszuordnung zugelassen werden, dass der gleiche Ring der viertletzten Reihenbusleitung zugeordnet wird. Falls dies weiterhin keine Zuordnung erlaubt, soll die gleiche Reihenbusleitungszuordnung wie bei der drittletzten Reihenbusleitung zugelassen werden, etc., bis die Reihenbusleitung zugeordnet werden kann.

[0109] Der vorstehende Algorithmus kann verwendet werden, um Multiplexer- und Zugangsschaltereinstellungen für eine bestimmte gewünschte Ringgeometrie zuzuweisen. Weil er versucht, die Anzahl von aktiven Zugangsschaltern zu maximieren, hilft er, den Abstand zwischen einem Verbindungspunkt und einem Subelement zu reduzieren. Dieser Algorithmus stellt eine nützliche Referenzmethode dar.

[0110] Bei einer gegebenen Schaltnetzwerkkonfiguration ist es nicht trivial zu bestimmen, wie effektiv diese Konfiguration im Falle einer Bildgebung sein wird. Der ultimative Prüfstandard, der verwendet werden sollte, um zu bestimmen, ob eine Konfiguration besser ist als eine andere, ist die Qualität der Bilder, die eine derartige Konfiguration hervorbringt. Jedoch ist diese bei Fehlen eines Arbeitsprototyps nahezu unmöglich zu bestimmen. Ferner stellt die Bestimmung der Bildqualität eine schwierige Metrik dar, so dass selbst mit einem Arbeitsprototypen diese aufgrund der Zeit und des Aufwands, die hierfür erforderlich sein könnten, nicht verwendet werden könnte, um alle möglichen Konfigurationen der Reihe nach zu untersuchen. Bei einer gegebenen bestimmten Konfiguration ist es möglich, Strahlprofile unter Verwendung eines vollständigen Computermodells der Elektronik zu simulieren. Diese Simulation würde jedoch sehr zeitaufwendig sein und sollte für lediglich ein paar wenige Konfigurationen und nicht für einen großen Selektionsprozess reserviert werden. Es ist auch möglich, unter Verwendung eines vereinfachten elektrischen Modells nur die Verzögerungs- und Amplitudenänderungen zu simulieren und anschließend diese als Eingangsgrößen für ein einfacheres Strahlformermodell zu verwenden, wobei dies für die Reihenuntersuchung der großen Anzahl von Eingangsgrößen, die erforderlich sind, wieder mehr Zeit benötigt,

als erwünscht. Eine etwas schnellere Methode besteht darin, vereinfachte Gleichungen zur Schätzung der Verzögerungen zu verwenden und anschließend das einfachere Stahlformmodell einzusetzen, wobei dies immer noch keine sehr schnelle Simulation darstellt, die eine erhebliche Anzahl von Untersuchungen vieler möglicher Konfigurationen ermöglichen würde.

[0111] Ein Verfahren, das eine sehr schnelle Auswertung vieler Konfigurationen ermöglicht, besteht darin anzunehmen, dass die Hauptauswirkung auf die Verzögerungen von dem Abstand von dem Subelement zu dem Verbindungspunkt herrührt. Eine Berechnung des Abstands von jedem Subelement zu dem nächsten Verbindungspunkt kann unter Verwendung von Nachschlagetabellen sehr schnell vorgenommen werden. Dies ermöglicht es, einen iterativen Algorithmus zu entwickeln, der eine große Anzahl von Konfigurationen durchsuchen kann. Während die vorliegende Erfindung nicht auf diese Implementierung beschränkt ist, stellt die Geschwindigkeit dieser Auswertungsmethode einen bedeutenden Vorteil dar, der einen praktischen Einsatz der Optimierung ermöglicht.

[0112] Es ist ein iterativer Algorithmus entwickelt worden, der gegenüber dem bereits beschriebenen einfachen Verfahren zur Bestimmung der Schaltkonfiguration eine große Verbesserung hinsichtlich des Verzögerungsfehlers ergibt. Der Algorithmus funktioniert wie folgt:

[1] Es wird eine Anfangskonfiguration vorgegeben. In einem Fall wurde das Ergebnis bzw. die Ausgabe des einfachen Algorithmus verwendet. Dies könnte auch eine zufällige Konfiguration sein.

[2] Für die spezielle Geometrie wird eine Nachschlagetabelle (LUT, Lookup Table) erzeugt. Diese LUT gibt den Abstand in Schaltern von irgendeinem Subelement in einem Ring zu irgendeinem anderen Subelement in dem Ring an. Um die Geschwindigkeit der Berechnung der LUT zu verbessern, wird ein maximaler Abstand verwendet, so dass jeder Abstand, der größer ist als dieser Maximalwert, einfach als größer als der Schwellenwert bezeichnet und nicht berechnet wird.

[3] Für die momentane Konfiguration macht der Algorithmus das Folgende:

[a] Er berechnet den Abstand (die Anzahl von Schaltern) von jedem Subelement zu dem nächsten Verbindungspunkt unter Verwendung der LUT.

[b] Er sortiert die Abstände und erhält Subelemente bei, die die M schlechtesten (d.h. größten) Abstände aufweisen. In einem Fall ist $M = 10$, so dass die zehn schlechtesten Abstände beibehalten werden.

[c] Er wählt durch Zufallsprinzip eines der Subelemente aus, das einen der M schlechtesten Ab-

stände aufweist. In diesem Fall wurde eine Zufallszahl zwischen 1 und 10 erzeugt, um das Subelement auszuwählen.

[d] Er schaltet den Zugangsschalter für das zufällig bzw. willkürlich gewählte Subelement ein. Dies wird wahrscheinlich eine Ausschaltung anderer Zugangsschalter und eine Veränderung des Multiplexers zwischen den Systemkanalbusleitungen und den Reihenbusleitungen auf der Reihe dieses Subelementes umfassen.

[e] Er wertet eine globale Kostenfunktion für diese neu erzeugte Konfiguration aus. Die spezielle Kostenfunktion, die verwendet worden ist, war die Anzahl von Subelementen, deren Schalterabstände größer waren als eine Schwelle. Der verwendete Schwellenwert betrug 4 und wurde auf der Basis einiger Simulationen mit einzelnen Leitungen der Schalter gewählt.

[f] Falls die Kostenfunktion kleiner ist als die Kostenfunktion der unveränderten Konfigurationen, wird die neue Konfiguration als die momentan beste angenommen.

[g] Falls die Kostenfunktion mit dem veränderten Schalter größer ist, kann sie dennoch beibehalten werden. Dies ist eine Simulated-Annealing-Art des Algorithmus. Es wird eine Temperaturfunktion definiert, wobei die Temperatur langsam in mehreren Iterationsschritten reduziert wird. Zu Beginn ist die Temperaturfunktion hoch, so dass die Wahrscheinlichkeit der Beibehaltung einer Konfiguration trotz ihres größeren Kostenfunktionswertes größer ist. Bei steigender Zahl der Iterationen wird die Temperatur erniedrigt, und die Wahrscheinlichkeit zur Beibehaltung einer minderwertigeren Konfiguration wird reduziert. Diese Algorithmusart ermöglicht dem System, aus einem lokalen Minimum herauszuspringen, und gibt ihm somit eine Chance, ein besseres (vielleicht nicht globales) Minimum aufzufinden.

[h] Der Prozess wiederholt sich für eine vorbestimmte Anzahl von Iterationsschritten oder bis sämtliche Abstände unterhalb des Schwellenwerts liegen.

[0113] Simulated Annealing (simuliertes langsames Abkühlen) ist ein allgemein bekanntes Rechenverfahren zur Optimierung einer Parameterauswahl, wenn eine vollständige Suche der möglichen Einstellungen nicht ausführbar ist. Annealing (Vergüten) bezeichnet einen physikalischen Prozess, bei dem Metalle bei ihrer Abkühlung kristallisieren. Der Endzustand dieses Abkühlprozesses hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der Gegenstände abgekühlt werden. Falls die Kühlung sehr langsam erfolgt, ist das System in der Lage, einen Zustand minimaler Energie zu erreichen. Wenn die Gegenstände sehr schnell abgekühlt werden, wird nur ein lokales Minimum der Energie erreicht. Simulated Annealing ist ein mathematischer Algorithmus, der den Abkühlprozess imitiert. Für den Prozess, den man versucht zu

untersuchen, wird eine Kostenfunktion definiert, wobei der Simulated Annealing Algorithmus versucht, diese Kostenfunktion zu minimieren. Hier entspricht die Kostenfunktion der Energie in dem physikalischen Prozess des Vergütens. Der Simulated Annealing Algorithmus beginnt mit einer bestimmten Konfiguration. Es werden willkürliche Änderungen der Konfiguration vorgenommen (d.h. auf Zufallsprinzip basierende Veränderungen der zu optimierenden Parameter vorgenommen). Diese Veränderungen müssen gegebenenfalls bestimmten Gesetzen oder Regeln folgen. Nach der Vornahme der Änderungen in der Konfiguration wird die Kostenfunktion erneut ausgewertet. Wenn die Kostenfunktion verringert worden ist, wird die Konfiguration zu der neuen Konfiguration geändert. Wenn die Kostenfunktion größer ist, kann sich die Konfiguration in Abhängigkeit von einem Wert einer Zufallsvariable ändern oder auch nicht. Wenn der Algorithmus fortschreitet, wird die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Konfiguration mit höheren Kosten beibehalten wird, reduziert. Indem das Auftreten einer Konfiguration mit höheren Kosten zugelassen wird, kann der Algorithmus lokale Minima vermeiden und näher zu einem eher absoluten Minimum gelangen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Konfiguration mit höheren Kosten beibehalten wird, ist am Anfang hoch und nimmt mit Verlauf des Algorithmus ab. Diese Wahrscheinlichkeit entspricht der Temperatur beim physikalischen Vergüten. Die Rate, mit der die Wahrscheinlichkeit abnimmt, bestimmt die Geschwindigkeit des Algorithmus. Wenn die Rate hoch ist, kommt die Antwort schnell, kann jedoch eventuell nicht in der Nähe des wahren Minimums liegen. Wenn die Rate langsam ist, braucht die Antwort eine längere Zeit, stellt jedoch mit einer größeren Wahrscheinlichkeit ein Minimum dar.

[0114] Eine Schaltkonfiguration wurde unter Verwendung des einfachen Algorithmus für ein mosaikartiges ringförmiges Array bestimmt. Bei dem einfachen Algorithmus hatten 172 von 7015 Subelementen einen Abstand, der größer war als vier Schalter. Dies bedeutet, dass über 97,5% der Subelemente unterhalb der Schwelle lagen. Unter Verwendung dieser Konfiguration als die Eingabe für den iterativen Algorithmus wurde eine neue Schaltkonfiguration ermittelt. In diesem Fall hatten lediglich 12 aus den 7015 Subelementen mehr als vier Schalter auf ihrem Weg zu einem Verbindungspunkt, d.h. mehr als 99,8% der Elemente lagen unter der Schwelle. Die zwölf Subelemente, die die Schwellenkriterien nicht erfüllten, waren alle in einem Abstand von fünf Schaltern angeordnet. Dies zeigt die Verbesserung gegenüber dem einfachen Algorithmus, in dem diejenigen Subelemente, die die Schwellenkriterien nicht erfüllten, von 172 auf 12 reduziert worden sind. Jedoch berücksichtigt der iterative Algorithmus nicht die Regel, die das System auf vier aktive Zugangsschalter pro Reihenbusleitung begrenzt. Es wurde ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt verwendet, um die Mehr-

schalter zu entfernen. Dieser Prozess entfernt sie in einer Weise, die versucht, die Vergrößerung des mittleren Abstandes zu minimieren. Die mit diesen entfernten Mehrschaltern erzielten Ergebnisse stellten eine deutliche Verbesserung gegenüber dem einfachen Algorithmus dar. Die meisten der Mehrschalter wurden in der Nähe der oberen und der unteren Seite entfernt, wo die Dichte der Verbindungen groß ist, so dass der Verlust klein bleibt.

[0115] Die Abstände wurden mit tatsächlichen Verzögerungen verglichen, die von Elektroniksimulationen hergeleitet worden sind. Nach einer Erzeugung einer Schaltkonfiguration unter Verwendung des iterativen Algorithmus ist es möglich, die Verzögerungen unter Verwendung eines vereinfachten Modells und einer Elektroniksimulationssoftware (wie beispielsweise HSPICE) zu simulieren. Dies gibt in genauerer Weise die zweidimensionale Natur des Verzögerungsproblems wieder, das aus Gründen der Rechengeschwindigkeit auf einen einzelnen Skalar reduziert worden ist. Die Ergebnisse der Simulation der Zeitverzögerungen für dieselbe Schalterkonfiguration unter Verwendung einer herkömmlichen elektronischen Simulationseinheit zeigten, dass die Spitzenwerte der tatsächlichen Verzögerungen stets bei einem Spitzenwert der Abstandsmetrik (die zur Optimierung verwendet worden ist) auftraten. Dies zeugt von der Tatsache, dass die Abstandsmetrik eine gute Metrik zur Verwendung für eine Optimierung ist. Es gab jedoch einige Spitzenwerte in der Abstandsmetrik, die keine zugehörigen Spitzenwerte der Verzögerung hatten. Dies hat etwas mit der zweidimensionalen Natur der Verzögerungen im Vergleich zu der eindimensionalen Natur der Abstandsmetrik zu tun.

[0116] Die vorstehend beschriebene Schaltermatrixrealisierung war das Ergebnis des iterativen Algorithmus. Jedoch können diese Ergebnisse sich für unterschiedliche Ketten unterscheiden und hängen auch von den verwendeten Temperaturparametern sowie der Schwelle und der Kostenfunktion ab. Es kann möglich sein, den momentanen Entwurf bei größerer Zeitdauer der Optimierung zu verbessern. Es sollte auch erwähnt werden, dass dies nur einen einzelnen beispielhaften Algorithmus zur Fehlerminimierung darstellt. Es können auch andere dazu verwendet werden, das Leistungsverhalten zu verbessern.

[0117] Um einen linearen Scann zu erzeugen, muss die aktive Apertur des mosaikartigen ringförmigen Arrays schrittweise quer durch das zugrundeliegende zweidimensionale Array fortgeschaltet werden. Diese Fortschaltung erfordert es, dass das Schaltnetzwerk neu konfiguriert wird. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Vornahme dieser Fortschaltung. Wenn die erforderliche Strahlteilung, wie sie durch die Auflösung des Arrays und die Anforderungen der vorliegenden Anwendung bestimmt ist, derart ist, dass die Fortschaltung um ein gesamtes Subelement

zulässig ist, kann die gleiche durch den Algorithmus abgeleitete Schaltkonfiguration für jeden Strahl verwendet werden. In diesem Fall schreitet die Schaltkonfiguration einfach über einen oder mehrere Subelemente für jeden Strahl fort. Um die Neuprogrammierung und die durch das System verbrauchte Leistung zur Rekonfiguration auf ein Minimum zu reduzieren, kann es möglich sein, die Schalterzustände unmittelbar von einem Subelement auf den Nachbar zu übertragen und dadurch eine externe Neuprogrammierung des gesamten Arrays zu vermeiden. Jedoch muss zusätzlich zu einer Verschiebung des Zugangs- und Matrixschaltermusters der Multiplexer, der die Reihenbusleitungen mit den Systemkanalbusleitungen verbindet, ebenfalls umgeschaltet bzw. geändert werden. Beim Fortschreiten des Strahls durch ganze Subelemente in der Richtung der Reihenbusleitungen ist diese Änderung einfach eine Drehung der Kanäle. Wenn beispielsweise vier Systemkanäle, die mit A, B, C bzw. D bezeichnet sind, mit den vier Reihenbusleitungen einer bestimmten Reihe für eine bestimmte Konfiguration verbunden sind, muss, wenn das Schaltmuster zu der nächsten Strahlstelle gescannt wird, der Zustand des Systemkanal/Reihen-Multiplexers derart angepasst werden, dass die Systemkanäle unter den vier Reihenbusleitungen im Turnus wechseln, z.B. die Systemkanäle B, C, D bzw. A jeweils in dieser Reihenfolge mit den gleichen vier Reihenbusleitungen verbunden werden. Alternativ könnte anstelle einer Veränderung des Multiplexers zwischen den Systemkanälen und den Reihenbusleitungen der Strahlformer des Systems unmittelbar die Geometrieänderung berücksichtigen und deshalb die Verzögerungen an den vier Kanälen anpassen, um die neuen Verzögerungen zu berücksichtigen.

[0118] Wie vorstehend erwähnt, besteht in dem Fall, dass die kreisringförmigen Ringe derart schrittweise umgeschaltet werden, dass die Bewegung ein ganzzahliges Vielfaches der Subelemente darstellt, kein Erfordernis für eine erneute Optimierung für jeden Strahl (wenn angenommen wird, dass die zugrundeliegende Schaltmatrix über dem gesamten zugrundeliegenden zweidimensionalen Array gleichbleibende elektrische Eigenschaften aufweist). Jedoch kann es Fälle geben, in denen die gewünschte Strahldichte es erfordert, dass Linien im Vergleich zu einem einzelnen Subelement enger aneinander liegen. In diesem Fall wird das Strahlzentrum um einen Bruchteil eines Subelementes weitersgeschaltet, so dass z.B. die Apertur verformt wird, um den Strahl effektiv um einen halben Schritt zwischen vollen Schritten der Apertur abzulenken, wodurch die Auflösung der Bildgebungseinrichtung erhöht wird. Für diese Fälle lässt sich die Optimierung nicht einfach übertragen, so dass eine neue Optimierung für jeden Teilschritt vorgenommen werden muss. Jedoch können diese um einen Bruchteil fortschreitenden Konfigurationen erneut auftreten, wenn das kreisringförmige Array über dem zugrundeliegenden zweidimensionalen Array

fortschreitet, um einen linearen Scann zu bilden. In diesen Fällen wird, wenn der gleiche Bruchteilsschritt erforderlich ist, die Optimierung die gleiche sein, so dass diese erneut verwendet werden kann. So wird selbst in dem Fall einer bruchteilweisen Fortschreitung eine kleine Zahl von Optimierungen erforderlich sein. In diesen Fällen kann es zur Einsparung der Programmierzeit und des Leistungsverbrauchs möglich sein, alle Strahlen für eine bestimmte Konfiguration abzufeuern und diese Konfiguration über dem Array in dem groben Strahlrastermaß vorzuschalten. In diesem Fall wäre es möglich, Konfigurationen von einem Subelement zu einem Nachbar unmittelbar zu übergeben. Nachdem der Grobscann beendet worden ist, kann eine neue Konfiguration, die einen Bruchteilsschritt gegenüber der alten Konfiguration darstellt, programmiert und über dem Array fortgeschaltet werden. Dies kann für jeden Bruchteilsschritt wiederholt werden. Die resultierenden grob beabstandeten Strahlen von jeder Konfiguration können durch den Scannkonverter miteinander verschachtelt werden, um den erwünschten feinen Strahlabstand zu erzielen. Es sollte auch erwähnt werden, dass bei einer Vermischung von Strahlen von unterschiedlichen Konfigurationen es erforderlich sein kann, die Verstärkung zwischen den Strahlen anzupassen, um Verstärkungsunterschiede beim Strahlformen auszugleichen und die Linien, von diesen unterschiedlichen Konfigurationen miteinander zu vermischen bzw. aneinander anzugleichen.

[0119] Der numerische Optimierungsalgorithmus, wie er vorstehend beschrieben ist, verbessert das Strahlformungsverhalten eines rekonfigurierbaren Arrays. Das zu lösende Problem bestand darin, dass in dem Fall vereinfachter Schaltnetzwerke für rekonfigurierbare Arrays die Verzögerungen, Amplitudenänderungen und Wellenformverzerrungen alle auf das vereinfachte Schaltnetzwerk zurückzuführen sind. Die Verwendung der numerischen Optimierungen kann bei der Minimierung des Fehlers und der Aufrechterhaltung eines angemessenen Strahlformungsverhaltens hilfreich sein. Es ist ein spezielles Beispiel für eine derartige Optimierung untersucht worden, bei dem eine einfache Metrik definiert und dazu verwendet worden ist, das Verhalten der verschiedenen Konfigurationen zu kennzeichnen. Die einfache Metrik, die in dem Beispiel verwendet worden ist, war die Anzahl von Schaltern zwischen einem gegebenen Subelement und dem nächsten Zugangsschalter, der mit einer Reihenbusleitung verbunden war (d.h. in einem geschlossenen Zustand). Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass diese einfache Metrik das Leistungsverhalten des Schaltnetzwerkes trotz der getroffenen groben Näherungen verbessern kann. Die einfache Metrik ermöglicht auch eine Untersuchung vieler Konfigurationen, was die Erfolgchance steigert.

[0120] Die hierin beschriebene Optimierungstech-

nik ergibt ein verbessertes Bildgebungsverhalten mit den vereinfachten Schaltnetzwerken für rekonfigurierbare Arrays. Die Reduktion der Verzögerungsfehler und Verzerrungen hat unmittelbar eine verbesserte Strahlformung, einschließlich einer verbesserten Auflösung und eines verbesserten Kontrastes, zur Folge.

[0121] Der Optimierungsalgorithmus kann entweder mit einem voll oder einem dünn bestückten Multiplexer verwendet werden. Der Algorithmus könnte seine Daten zeitlich im Voraus erzeugen, um diese zu speichern und später zu verwenden, oder er könnte lokal während eines Bildgebungsvorgangs erzeugt werden, um zunehmende Verbesserungen aufgrund von Veränderungen der Arraywiderstände zu erzielen. Der Algorithmus könnte während der Entwurfsphase unter Annahme idealer Widerstandswerte, zum Zeitpunkt der Herstellung unter Verwendung der tatsächlichen Widerstandswerte, wie sie gemessen werden, oder periodisch im Feld (z.B. jedes Mal, wenn die Ultraschallbildgebungsmaschine eingeschaltet wird, oder im Gebrauch, wenn festgestellt wird, dass eine Kalibrierung vorgenommen werden muss, oder wenn die Arraykonfiguration verändert wird) in Form eines Kalibrierungsschritts vorgenommen werden, wenn das System altert oder um auf die Temperatur zurückzuführende Veränderungen zu kompensieren. Beispielsweise könnte das System in Abhängigkeit von der Erfassung einer vorbestimmten Temperaturänderung automatisch kalibriert werden. Außerdem würden Schwankungen der Kapazitäten der hergestellten cMUTs ebenfalls das Arrayverhalten beeinflussen. Diese Schwankungen könnten durch Wiederholung der Optimierungsprozedur, nachdem die exakte cMUT-Kapazität für jedes Subelement in dem hergestellten Array gemessen worden ist, kompensiert werden.

[0122] Kalibrierungsdaten sind für jede Sonde gleich und könnten gemeinsam mit jeder Sonde in einem ROM oder EPROM abgespeichert werden, oder sie könnten in dem Bildgebungssystem in Form einer Datei gespeichert sein, die über einen Datenlink in dem Kabel zu der Sonde heruntergeladen wird, um lokal in einem RAM, EEPROM, FRAM, etc. in der Sonde selbst gespeichert zu werden. Diese Daten würden dann aus dem lokalen Speicher (der Sonde) beim Scannen ausgelesen werden, so dass bei jedem neuen Scann die neuen benötigten Konfigurationsdaten ausgelesen werden würden. Alternativ könnten die Kalibrierungsdaten während eines System Einsatzes berechnet und dann zu der Sonde heruntergeladen werden.

[0123] Die Integration der Zugangs- und Matrixschalter zur Verbindung von Sensorelementen mit Busleitungen ergibt eine größere Flexibilität. Entsprechend verschiedenen Ausführungsformen der Erfindung können eine oder mehrere der folgenden Merk-

male verwendet werden:

- (1) Die Zugangsschalter können abgestuft oder versetzt angeordnet sein, um die Anzahl von Zugangsschaltern, die für eine gegebene Anzahl von Busleitungen erforderlich sind, zu reduzieren.
- (2) Ein einzelner Zugangsschalter kann für ein Subelement in einem abgestuften Muster verwendet werden.
- (3) Ein Mapping mit zufälliger Zuordnung von Zugangsschaltern auf Busleitungen kann verwendet werden, um auf die sich wiederholenden Muster zurückzuführenden Artefakte zu reduzieren.
- (4) Es können mehr als ein einzelner Zugangsschalter in jedem Subelement verwendet werden, wobei dies immer noch weniger Schalter sind als die Anzahl von Busleitungen und Systemkanälen.
- (5) Busleitungen können mit Systemkanälen unter Verwendung einer Kreuzungspunkt-Schaltmatrix verbunden werden.
- (6) Ein dünn bestückter Kreuzungspunktschalter kann verwendet werden, um Busleitungen mit Systemkanälen zu verbinden.
- (7) Schalter können konfiguriert werden, um sicherzustellen, dass es jeweils unterschiedliche Zugangsschalter gibt, die an beiden Enden einer langen Kette oder Folge von Matrixschalterverbindungen angeschlossen sind, wobei diese Zugangsschalter mit derselben Busleitung verbunden sind, um die Verzögerung zu reduzieren.
- (8) Es können Schaltkonfigurationen verwendet werden, in denen ein Satz von Matrixschaltern und eine begrenzte Anzahl von Zugangsschaltern vorhanden sind. Die Matrixschalter verbinden benachbarte Subelemente in dynamischer Weise miteinander. Die Zugangsschalter sind an Busleitungen angeschlossen, die auf Systemkanälen gemultiplext sind.

[0124] Gemäß verschiedenen Ausführungsformen der Erfindung können ein oder mehrere der folgenden zusätzlichen Merkmale in dem System vorhanden sein:

- (1) In jedem Subelement wird ein einzelner Zugangsschalter pro Busleitung verwendet.
- (2) Pro Reihe können mehrere Busleitungen verwendet werden.
- (3) Die Busleitungen können sowohl vertikal als auch horizontal in einem Array angeordnet sein. Gemäß einer Ausführungsform wird, falls ein Satz von Busleitungen horizontal angeordnet ist, während ein anderer Satz vertikal angeordnet ist, jedes Subelement oder jede Gruppe von Subelementen über einen einzelnen Zugangsschalter an eine vertikale Busleitung anschließbar sein und wird ferner über einen anderen Zugangsschalter an eine horizontale Busleitung anschließbar sein. In dem Fall, in dem Busleitungen in beide Richtungen verlaufen, könnte jedoch, wenn der für Busleitungen verfügbare Platz der Elektronik zu klein wird und mehr Busleitungen erforderlich sind, wo-

bei es weiterhin nur einen einzelnen Zugangsschalter in einem Subelement gibt, der Zugangsschalter jedes Subelementes entweder mit der horizontalen Busleitung oder mit der vertikalen Busleitung und nicht mit beiden verbunden sein. Dies hat auch dann Auswirkungen, wenn die Anzahl von Schaltern, die für eine gegebene Busleitung eingeschaltet sein können, durch die Stromentnahme und die Größe der Leitung begrenzt ist.

Zugangsschalter können gewählt werden, um in gleichem Abstand zu jedem Rand eines Rings (oder einer sonstigen Gestalt) zu liegen, um die Verzögerung innerhalb des Rings auf ein Minimum zu reduzieren. Ein „Rand eines Rings“ bezieht sich auf den Fall, in dem die Rekonfigurierbarkeit dazu verwendet wird, ein Ringarray zu approximieren. In diesem Fall gibt es ein erwünschtes ringförmiges Array oder eine Ringstruktur, das oder die man durch Verbindung von Subelementen nachzubilden wünscht. Der Rand des Rings bezieht sich auf das Subelement in der Nähe der Begrenzung des Rings, den man versucht zu approximieren, d.h. es ist der Rand des größeren Elementes, das durch Verbindung von Subelementen gebildet wird. Die Zugangsschalter sollten derart gewählt werden, dass sie auf beiden Seiten des Elementes und nicht alle auf einer einzelnen Seite liegen. Die Gestalt braucht nicht ringförmig zu sein; stattdessen könnten andere Formen verwendet werden, und es wäre am besten, Zugangsschalter an beiden Rändern der Gestalt zu haben, die durch Verbindung der Subelemente approximiert wird.

(5) Es könnten mehr als nur ein einzelner Zugangsschalter pro Busleitung in jedem Subelement verwendet werden. Diese redundante Verbindung verbessert die Ausbeute der Vorrichtungen.

(6) Es könnte die Möglichkeit vorgesehen sein, Ringmuster zwischen Senden und Empfangen und in mehreren Intervallen während eines Empfangs zu aktualisieren.

(7) Ein einzelner Zugangsschalter könnte mit einem gesamten Ring von Subelementen verbunden sein, wobei alle Subelemente wiederum durch Matrixschalter untereinander verbunden sind.

(8) Mehrere Zugangsschalter könnten mit einem gesamten Ring verbunden sein, während Matrixschalter zwischen Subelementen Zugangsschalter aufweisen, um jeweilige Abschnitte des Rings zu bilden.

(9) Mehrere Zugangsschalter könnten mit einem gesamten Ring verbunden sein, während die Schalter äquidistant um den Ring herum zueinander beabstandet verteilt angeordnet sind, um die Signalverzögerung für diese Subelemente zwischen den Schaltern zu reduzieren.

(10) Es können mehrere Ringe gebildet sein, wo-

bei jeder Ring mit einem einzelnen Systemkanal unter Verwendung eines oder mehrerer Zugangsschalter verbunden ist, während jeder der Zugangsschalter mit einer Busleitung verbunden ist, die wiederum an einen Systemkanal angeschlossen ist.

(11) Es können mehrere redundante Matrixschalterverbindungen verwendet werden, um einen einzelnen Ring zu bilden, um den Reihenwiderstand zu reduzieren und dadurch die Verzögerung zu reduzieren.

(12) Matrixschalter können dazu verwendet werden, für ein gegebenes Array ein bekanntes schlechtes Subelement zu überbrücken oder eine Umleitung um dieses zu schaffen.

(13) Es können andere Muster außer Ringen gebildet werden, während weiterhin die Platzierung der Zugangsschalter derart gewählt werden kann, dass die Verzögerung minimiert wird.

(14) Ein gesamtes Ringmuster kann verschoben werden, um einen sich bewegenden Strahl zu erzeugen, indem der Minimalverzögerungsalgorithmus bei jedem neuen Schritt der Verschiebung wiederholt eingesetzt wird.

(15) Das Zentrum eines Elementes kann durch Veränderung der Gestalt des Elementes mit einer Schrittweite fortgeschaltet werden, die kleiner ist als ein vollständiges Subelement.

[0125] Die Schaltelektronik kann unter Verwendung der CMOS- oder BiCMOS- oder SOI- oder MEMS- oder einer sonstigen bisher nicht identifizierten Schalttechnologie aufgebaut werden.

[0126] Während die Erfindung mit Bezug auf die bevorzugten Ausführungsformen beschrieben worden ist, versteht es sich für einen Fachmann auf dem Gebiet, dass verschiedene Veränderungen vorgenommen werden können und ihre Elemente durch äquivalente Mittel ersetzt werden können, ohne von dem Schutzzumfang der Erfindung abzuweichen. Außerdem können viele Modifikationen vorgenommen werden, um eine bestimmte Situation an die Lehre der Erfindung anzupassen, ohne deren wesentlichen Rahmen zu verlassen. Deshalb besteht die Absicht, dass die Erfindung nicht auf die bestimmte Ausführungsform beschränkt sein soll, die hier beschrieben und als die beste Ausführungsform der Erfindung angesehen wird, sondern dass die Erfindung auch sämtliche Ausführungsformen umfassen soll, die in den Schutzzumfang der beigefügten Ansprüche fallen.

Zusammenfassung:

[0127] Das hier beschriebene rekonfigurierbare Ultraschallarray ermöglicht es, Gruppen von Subelementen in dynamischer Weise miteinander zu verbinden, so dass die Gestalt des resultierenden Elementes an die Form der Wellenfront angepasst werden kann. Dies kann zu einem verbesserten Funktions-

verhalten und/oder einer reduzierten Kanalanzahl führen. Eine Rekonfigurierbarkeit kann unter Verwendung eines Schaltnetzwerks erreicht werden. Eine Methodik und ein Algorithmus sind offenbart, die eine Verbesserung des Funktionsverhaltens dieses Schaltnetzwerks durch richtige Wahl der Konfiguration des Schaltnetzwerks ermöglichen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Implementierung einer Schaltkonfiguration, die durch ein Netzwerk von Schaltern während einer Steuerung eines rekonfigurierbaren Arrays von Sensorelementen hervorgerufene Fehler minimiert, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- (a) Erzeugung einer anfänglichen Schaltkonfiguration; und
- (b) Durchführung eines iterativen Algorithmus, das die folgenden Schritte aufweist:
 - (i) Eingabe einer Schaltkonfiguration in ein Modell des Systems, das die Antwort des Systems berechnet, unter Berücksichtigung sämtlicher Schaltnetzwerkfehler, wobei die anfängliche Schaltkonfiguration zu Beginn eingegeben wird, während sukzessiv abgeleitete modifizierte Schaltkonfigurationen in Folge danach eingegeben werden;
 - (ii) Erzeugung eines Bildes oder Strahlungsmusters unter Verwendung des Modells mit der eingegebenen Schaltkonfiguration;
 - (iii) Berechnung eines Wertes für eine Kostenfunktion wenigstens zum Teil auf der Basis von Daten, die das erzeugte Muster repräsentieren;
 - (iv) Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion kennzeichnet; und
 - (v) falls der berechnete Wert kein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Modifikation der momentanen Schaltkonfiguration in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Werteberechnung, um zu einer modifizierten Schaltkonfiguration zu gelangen, wobei die Schritte (i) bis (v) für jede Schaltkonfiguration wiederholt werden; und
- (c) falls der berechnete Wert ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Konfiguration des Schaltnetzwerks mit der modifizierten Schaltkonfiguration, die zu einer Minimierung des Kostenfunktionswertes geführt hat.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Konfigurationsschritt eine Programmierung einer Steuerungsschaltung zur Steuerung der Zustände der Schalter aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt der Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, unter Verwendung eines Simulated-Annealing-Algorithmus durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die verwendete Kostenfunktion durch die Anzahl von Sensorelementen gebildet ist, deren Schalterabstände größer sind als eine vorbestimmte Schwelle.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die verwendete Kostenfunktion sich mit der Anwendung ändert.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei eine erste Kostenfunktion verwendet wird, um eine erste Schaltkonfiguration zur Verwendung für den Betrieb des Arrays von Sensorelementen in einem Sendemodus zu optimieren, während eine zweite Kostenfunktion verwendet wird, um eine zweite Schaltkonfiguration für eine Verwendung zu optimieren, wenn das Array von Sensorelementen in einem Empfangsmodus betrieben wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5, wobei eine erste Kostenfunktion zur Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration für eine Verwendung verwendet wird, bei der das Array von Sensorelementen gemäß einem ersten Satz von Systemparametern betrieben wird, während eine zweite Kostenfunktion verwendet wird, um eine zweite Schaltkonfiguration für eine Verwendung zu optimieren, wenn das Array von Sensorelementen gemäß einem zweiten Satz von Systemparametern betrieben wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verfahren immer dann durchgeführt wird, wenn sich die Konfiguration des Arrays von Sensorelementen verändert.

9. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verfahren immer dann durchgeführt wird, wenn eine vorbestimmte Temperaturänderung in der Betriebsumgebung des Arrays von Sensorelementen erfasst wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Array von Sensorelementen mit einem Bildgebungssystem gekoppelt ist und das Verfahren immer dann durchgeführt wird, wenn das Bildgebungssystem eingeschaltet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Array von Sensorelementen in einer Sonde enthalten ist, die mit einem Bildgebungssystem gekoppelt werden kann, und wobei Daten, die die modifizierte Schaltkonfiguration repräsentieren, die zu einer Minimierung des Kostenfunktionswertes geführt hat, in einem Speicher in der Sonde gespeichert werden.

12. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Array von Sensorelementen in einer Sonde enthalten ist, die mit einem Bildgebungssystem gekoppelt werden kann, und wobei Daten, die die modifizierte Schaltkonfiguration repräsentieren, die zu einer Minimierung des Kostenfunktionswertes geführt hat, in einem Speicher in dem Bildgebungssystem gespeichert und

später zu einem lokalen Speicher in der Sonde heruntergeladen werden.

13. Verfahren nach Anspruch 1, wobei Daten, die die modifizierte Schaltkonfiguration repräsentieren, die eine Minimierung des Kostenfunktionswertes herbeigeführt hat, während eines Scannvorgangs aus dem lokalen Speicher ausgelesen werden.

14. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verfahren während einer Entwurfsphase unter der Annahme idealer Widerstandswerte für die Schalter durchgeführt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 13, wobei jedes Sensorelement durch ein jeweiliges Ultraschallwandlerelement gebildet ist und das Verfahren während der Entwurfsphase unter der Annahme idealer Kapazitätswerte für die Ultraschallwandlerelemente durchgeführt wird.

16. Verfahren zur Implementierung einer Schaltkonfiguration, die die durch ein Netzwerk von Schaltern während einer Steuerung eines rekonfigurierbaren Arrays von Sensorelementen herbeigeführten Fehler minimiert, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- (a) Erzeugung einer anfänglichen Schaltkonfiguration; und
- (b) Durchführung eines iterativen Algorithmus, das die folgenden Schritte aufweist:
 - (i) Eingabe einer Schaltkonfiguration in ein System, wobei die anfängliche Schaltkonfiguration zu Beginn eingegeben wird und sukzessiv abgeleitete modifizierte Schaltkonfigurationen in Folge danach eingegeben werden;
 - (ii) Bestimmung des Verhaltens des Systems mit der eingegebenen Schaltkonfiguration;
 - (iii) Berechnung eines Wertes für eine Kostenfunktion wenigstens zum Teil auf der Basis von Daten, die das bestimmte Verhalten des Systems repräsentieren;
 - (iv) Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt; und
 - (v) falls der berechnete Wert kein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Modifikation der momentanen Schaltkonfiguration in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Werteberechnung, um zu einer modifizierten Schaltkonfiguration zu gelangen, wobei die Schritte (i) bis (v) für jede Schaltkonfiguration wiederholt werden; und
 - (c) falls der berechnete Wert ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, Konfiguration des Schaltnetzwerks mit der modifizierten Schaltkonfiguration, die zu einer Minimierung des Kostenfunktionswertes geführt hat.

17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Konfigurationsschritt eine Programmierung einer Steuerungsschaltung zur Steuerung der Zustände der

Schalter aufweist.

18. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Schritt der Bestimmung, ob der berechnete Wert im Wesentlichen ein Minimum für die Kostenfunktion darstellt, unter Verwendung eines Simulated-Annealing-Algorithmus durchgeführt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 16, wobei die verwendete Kostenfunktion durch die Anzahl von Sensorelementen gebildet ist, die Schalterabstände aufweisen, die größer sind als eine vorbestimmte Schwelle.

20. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Schritt (b)(ii) den Schritt einer Berechnung eines Strahlungsmusters des Systems aufweist.

21. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Schritt (b)(ii) den Schritt einer Auswertung eines durch das System erzeugten Bildes aufweist.

22. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Schritt (b)(ii) den Schritt der Durchführung elektrischer Messungen des Systems aufweist.

23. Verfahren nach Anspruch 16, wobei jedes Sensorelement durch ein jeweiliges Ultraschallwandlerelement gebildet ist und der Schritt (b)(ii) den Schritt einer Messung der Durchlasswiderstände der Schalter und einer Messung der Kapazitäten der Ultraschallwandlerelemente aufweist.

24. Verfahren nach Anspruch 16, wobei sich die verwendete Kostenfunktion mit der Anwendung ändert.

25. Verfahren nach Anspruch 24, wobei eine erste Kostenfunktion verwendet wird, um eine erste Schaltkonfiguration für eine Verwendung zu optimieren, bei der das Array von Sensorelementen in einem Sendemodus betrieben wird, während eine zweite Kostenfunktion verwendet wird, um eine zweite Schaltkonfiguration für eine Verwendung zu optimieren, bei der das Array von Sensorelementen in einem Empfangsmodus betrieben wird.

26. Verfahren nach Anspruch 24, wobei eine erste Kostenfunktion verwendet wird, um eine erste Schaltkonfiguration für eine Verwendung zu optimieren, bei der das Array von Sensorelementen gemäß einem ersten Satz von Systemparametern betrieben wird, während eine zweite Kostenfunktion verwendet wird, um eine zweite Schaltkonfiguration für eine Verwendung zu optimieren, bei der das Array von Sensorelementen gemäß einem zweiten Satz von Systemparametern betrieben wird.

27. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Verfahren immer dann durchgeführt wird, wenn sich die

Konfiguration des Arrays von Sensorelementen verändert.

28. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Verfahren immer dann durchgeführt wird, wenn eine vorbestimmte Temperaturänderung in der Betriebsumgebung des Arrays von Sensorelementen erfasst wird.

29. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Array von Sensorelementen mit einem Bildgebungssystem gekoppelt ist und das Verfahren immer dann durchgeführt wird, wenn das Bildgebungssystem eingeschaltet wird.

30. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Array von Sensorelementen in einer Sonde enthalten ist, die mit einem Bildgebungssystem gekoppelt werden kann, und wobei die Daten, die die modifizierte Schaltkonfiguration repräsentieren, die zu einer Minimierung des Kostenfunktionswertes geführt hat, in einem Speicher in der Sonde gespeichert werden.

31. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Array von Sensorelementen in einer Sonde enthalten ist, die mit einem Bildgebungssystem gekoppelt werden kann, und wobei die Daten, die die modifizierte Schaltkonfiguration repräsentieren, die eine Minimierung des Kostenfunktionswertes herbeigeführt hat, in einem Speicher in dem Bildgebungssystem gespeichert und später zu einem lokalen Speicher in der Sonde heruntergeladen werden.

32. Verfahren nach Anspruch 16, wobei die Daten, die die modifizierte Schaltkonfiguration repräsentieren, die zu einer Minimierung des Kostenfunktionswertes geführt hat, während eines Scannvorgangs aus dem lokalen Speicher in die Sonde ausgelesen werden.

33. Verfahren nach Anspruch 16, wobei jedes Sensorelement durch ein jeweiliges Ultraschallwandlerelement gebildet ist und das Verfahren für jede von einer Vielzahl von Apperturkonfigurationen zur Rekonfiguration an mehreren Fokuszonen während eines Empfangsmodus durchgeführt wird.

34. Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallbildgebungssystems, das ein Array von Ultraschallwandlerelementen aufweist, die durch Steuerung der jeweiligen Zustände eines Netzwerks von Schaltern rekonfigurierbar sind, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

(a) Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem ersten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems; und
(b) Optimierung einer zweiten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem zweiten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems, wobei die Optimierungsschritte eine Minimierung ei-

ner Kostenfunktion unter Verwendung eines iterativen Algorithmus umfassen.

35. Verfahren nach Anspruch 34, wobei das Array von Ultraschallwandlerelementen eine erste Apperturkonfiguration in dem ersten Betriebszustand und eine zweite Apperturkonfiguration, die sich von der ersten Apperturkonfiguration unterscheidet, in dem zweiten Betriebszustand aufweist.

36. Verfahren nach Anspruch 34, wobei das Array von Ultraschallwandlerelementen in dem ersten Betriebszustand in einem Sendemodus und in dem zweiten Betriebszustand in einem Empfangsmodus betrieben wird.

37. Verfahren nach Anspruch 34, wobei die verwendete Kostenfunktion durch die Anzahl von Sensorelementen mit Schalterabständen gebildet ist, die größer sind als eine vorbestimmte Schwelle.

38. Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallbildgebungssystems, das ein Array von Ultraschallwandlerelementen aufweist, die durch Steuerung der jeweiligen Zustände eines Netzwerks von Schaltern rekonfigurierbar sind, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

(a) Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem ersten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems durch Minimierung einer ersten Kostenfunktion unter Verwendung eines ersten iterativen Algorithmus; und
(b) Optimierung einer zweiten Schaltkonfiguration zur Verwendung in einem zweiten Betriebszustand des Ultraschallbildgebungssystems durch Minimierung einer zweiten Kostenfunktion unter Verwendung eines zweiten iterativen Algorithmus, wobei sich die zweite Kostenfunktion von der ersten Kostenfunktion unterscheidet.

39. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Modell voraussetzt, dass Subelemente über einen voll bestückten Multiplexer mit Systemkanälen verbunden sind.

40. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Modell voraussetzt, dass Subelemente über einen dünn bestückten Multiplexer mit Systemkanälen verbunden sind.

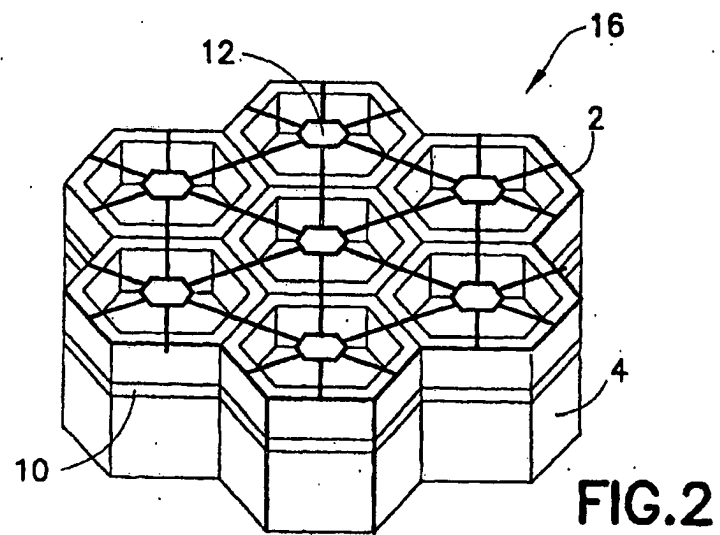
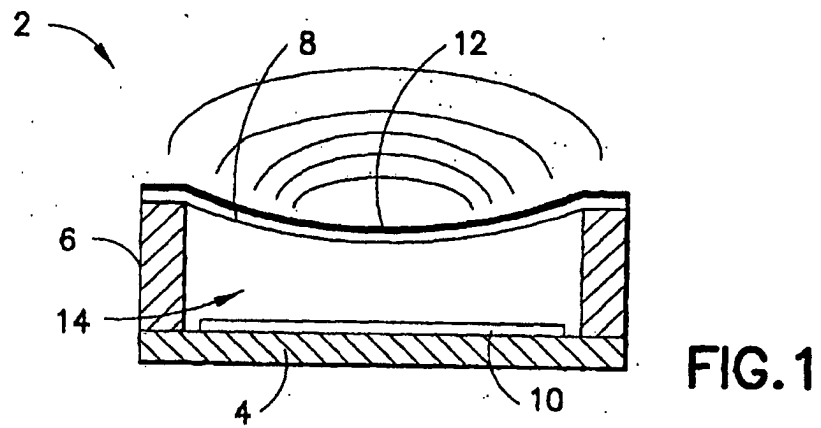
41. Verfahren zum Betreiben eines Ultraschallbildgebungssystems, das ein Array von Ultraschallwandlerelementen aufweist, die durch Steuerung der jeweiligen Zustände eines Netzwerks von Schaltern rekonfigurierbar sind, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

(a) Optimierung einer ersten Schaltkonfiguration, die eine erste Appertur einrichtet, die einen ersten Satz von ausgewählten Ultraschallwandlerelementen aufweist; und

(b) Optimierung einer zweiten Schaltkonfiguration, die eine zweite Appertur einrichtet, die einen zweiten Satz ausgewählter Ultraschallwandler Elemente aufweist, wobei das Strahlzentrum für die zweite Appertur um einen Bruchteil eines Ultraschallwandler Elementes in Bezug auf das Strahlzentrum der ersten Appertur fortgeschaltet ist.

Es folgen 16 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



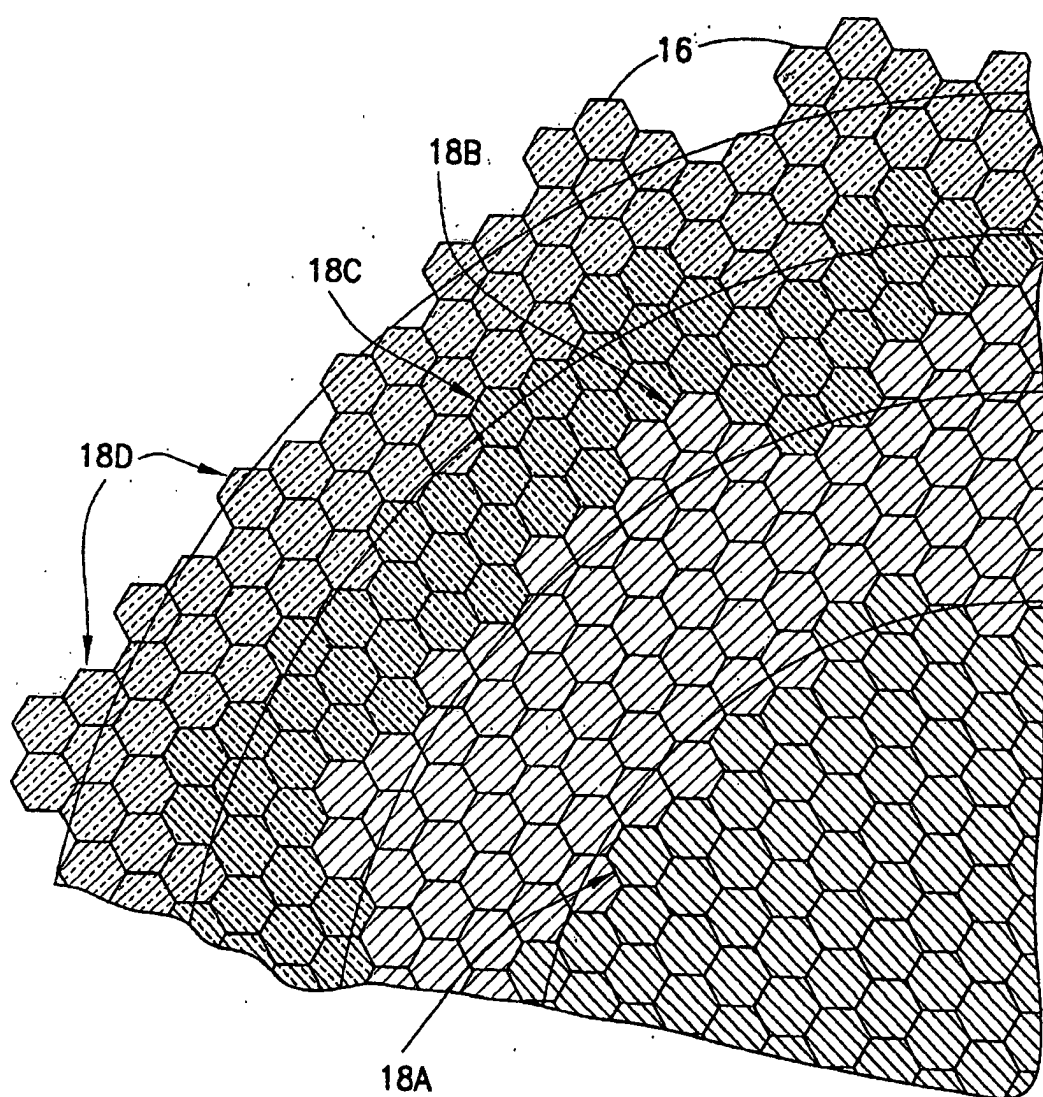


FIG.3

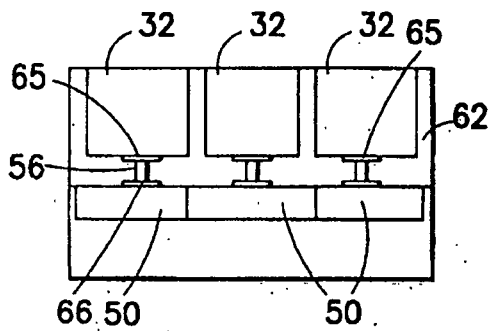


FIG. 4

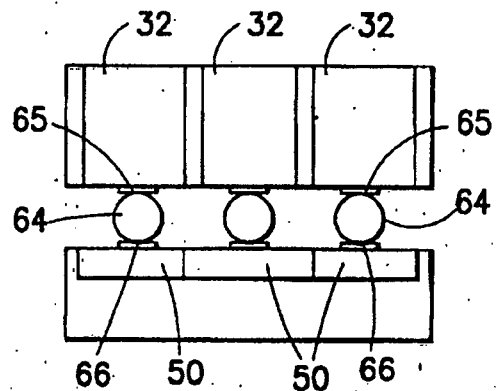


FIG. 5

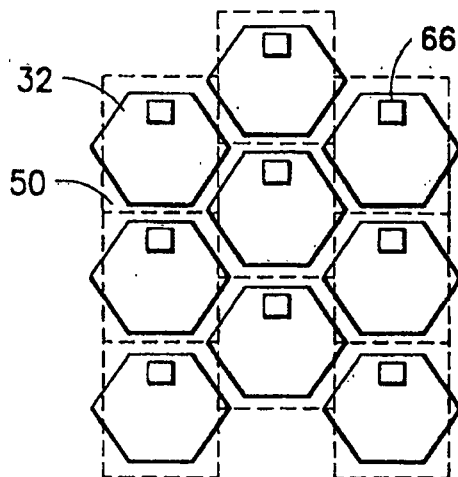


FIG. 6

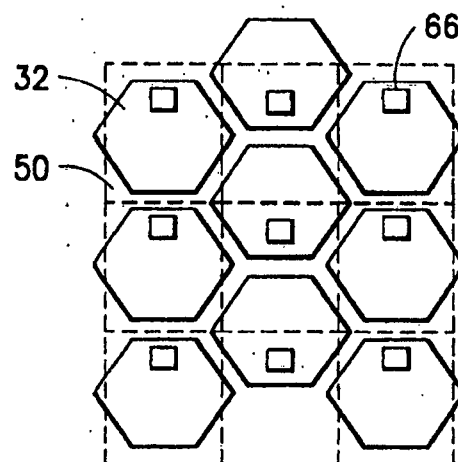


FIG. 7

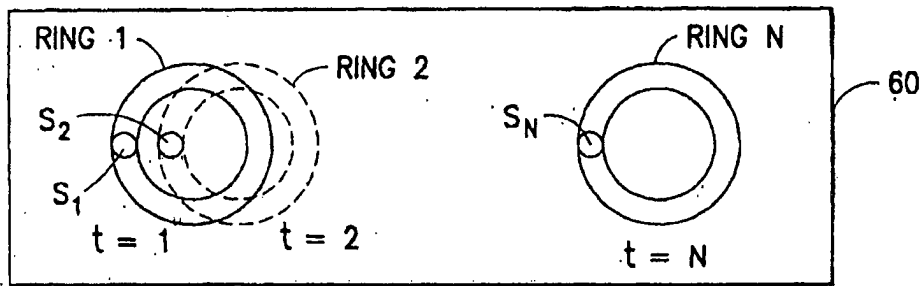


FIG. 8

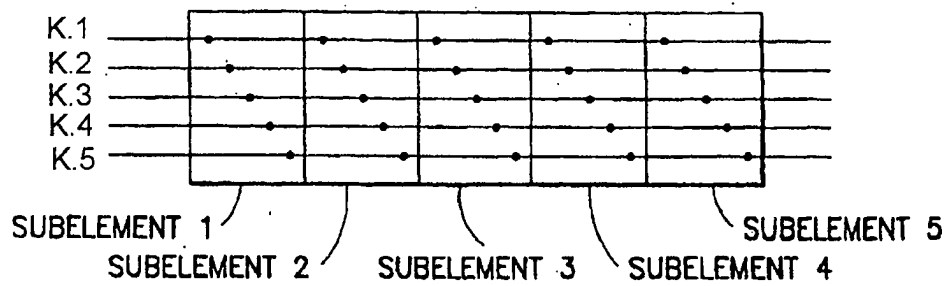


FIG. 9

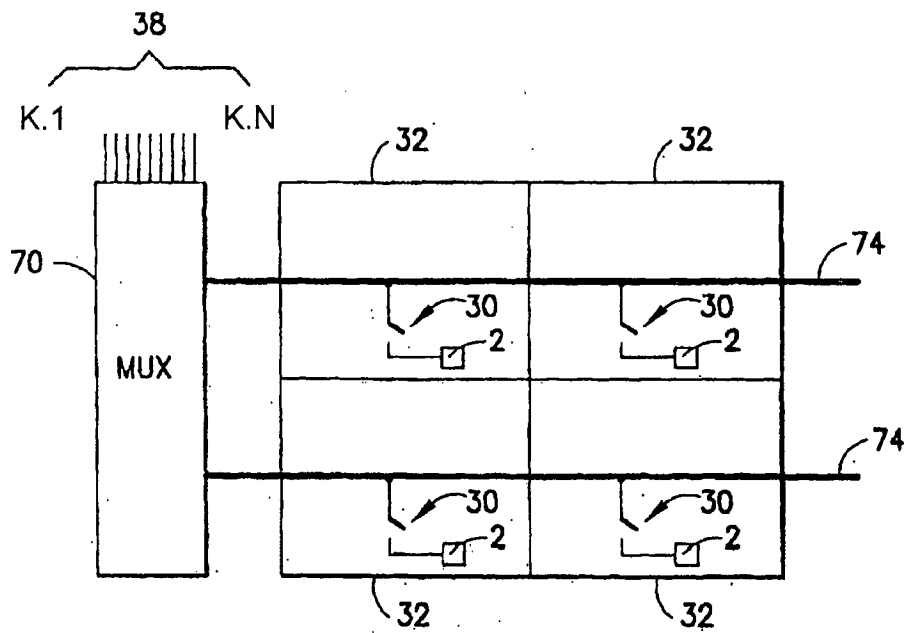


FIG.10

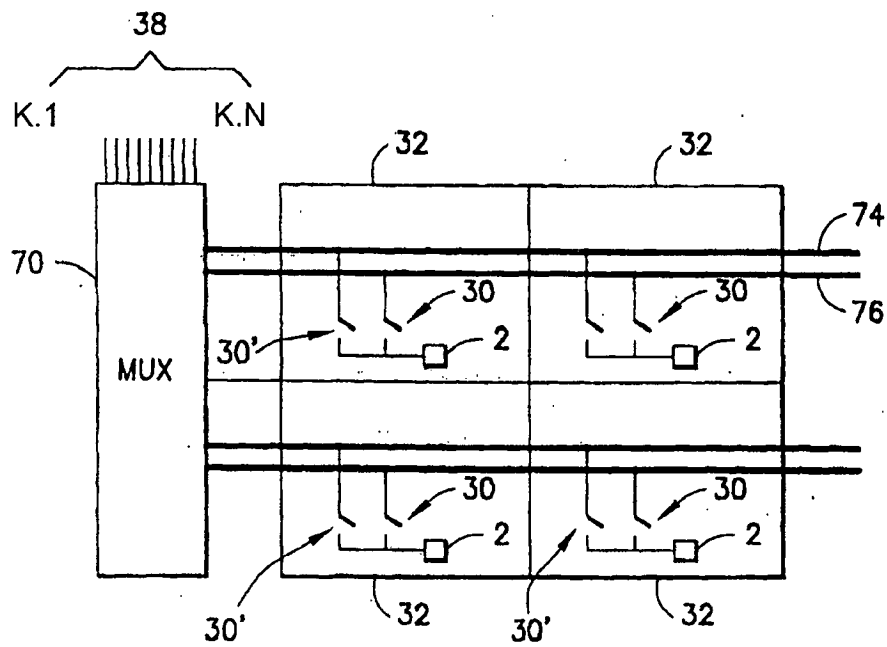


FIG.11

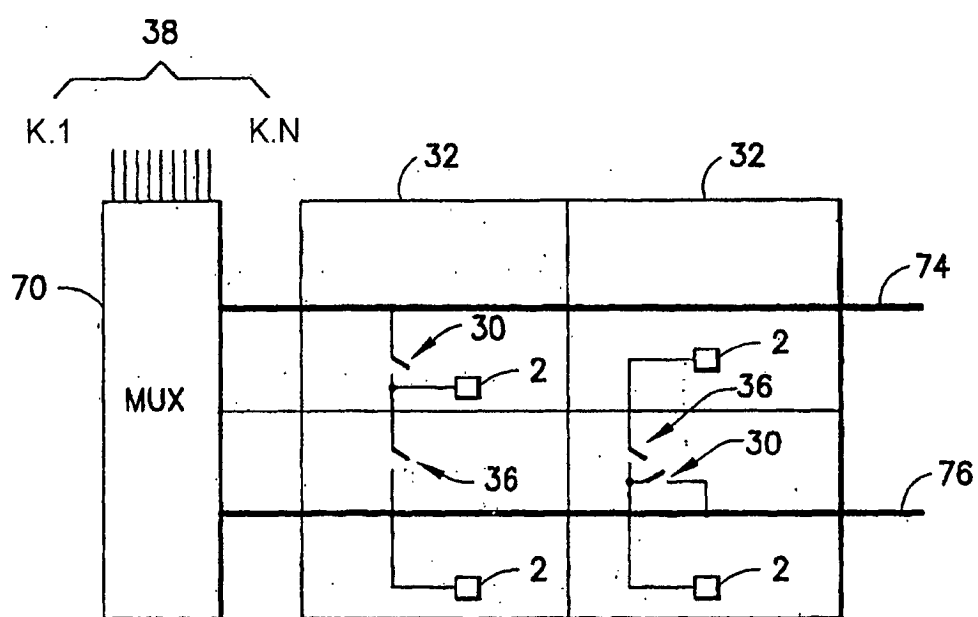
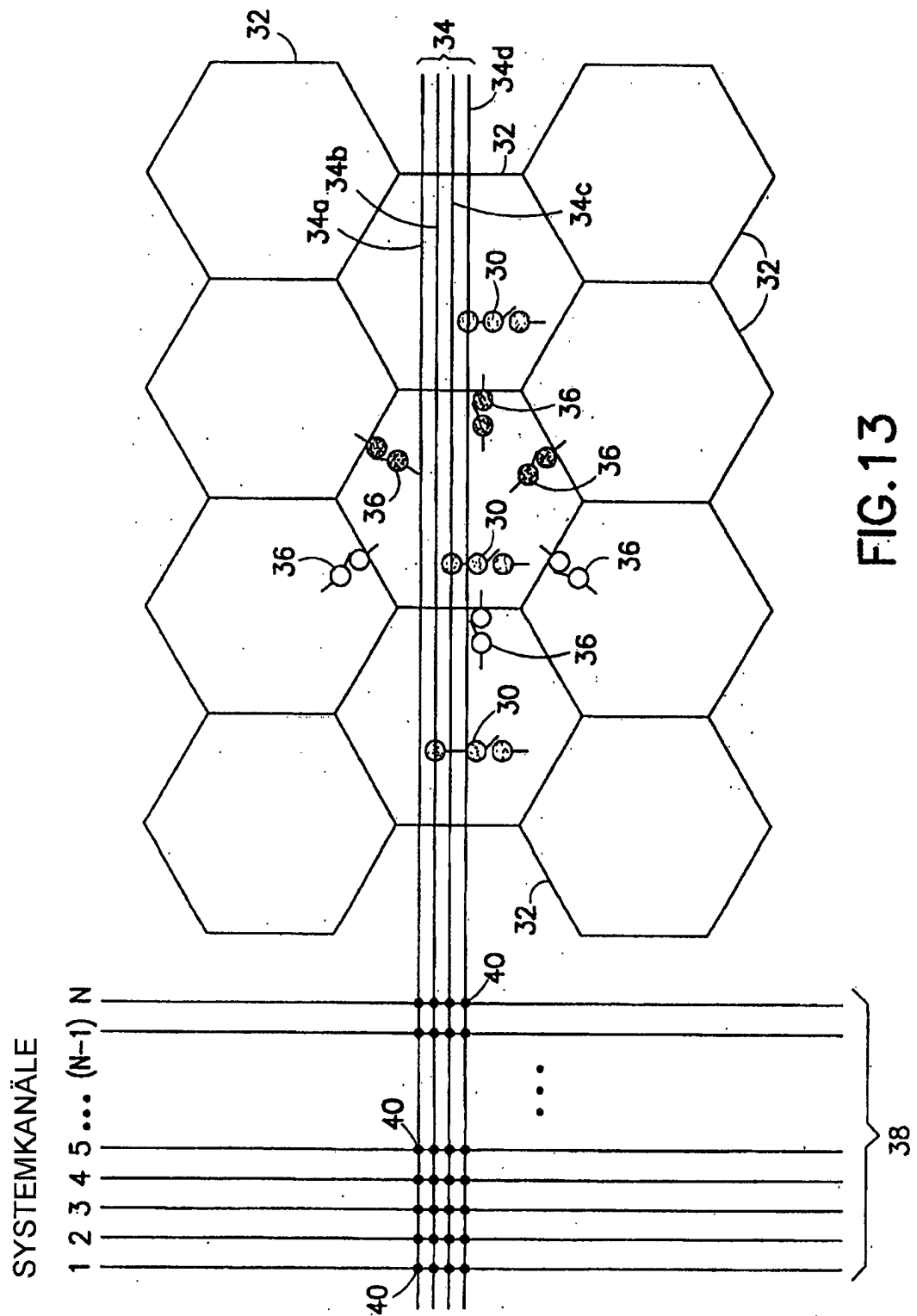


FIG.12



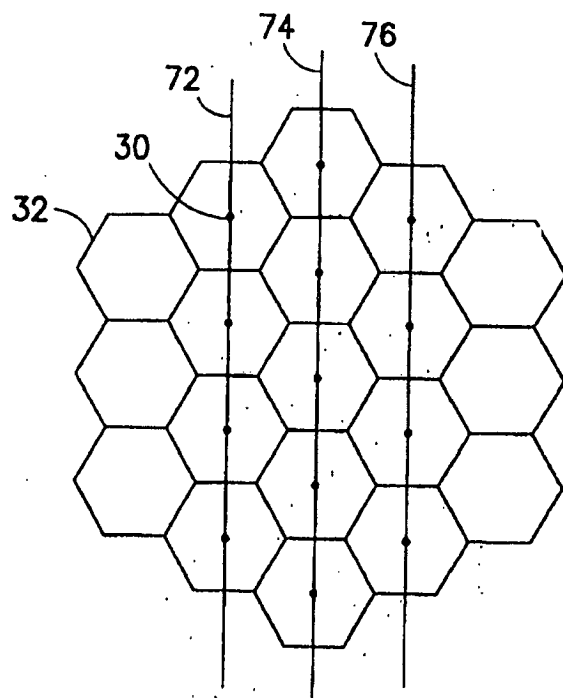


FIG. 14

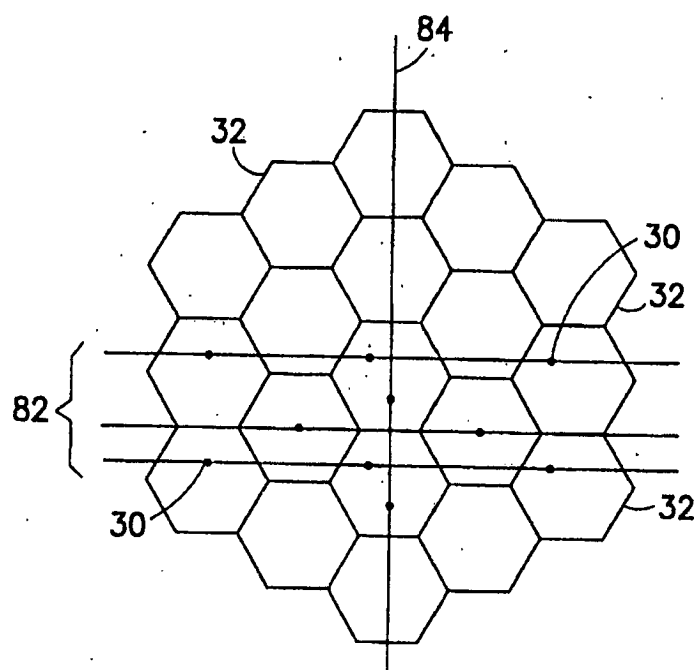


FIG. 15

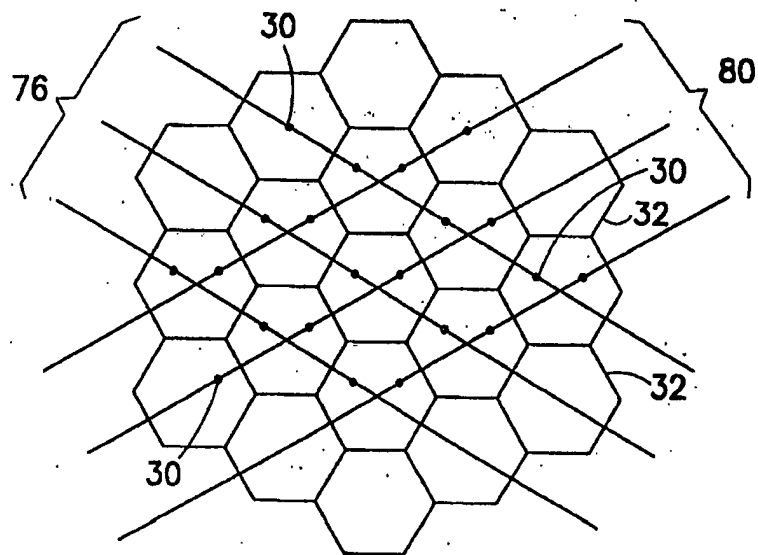
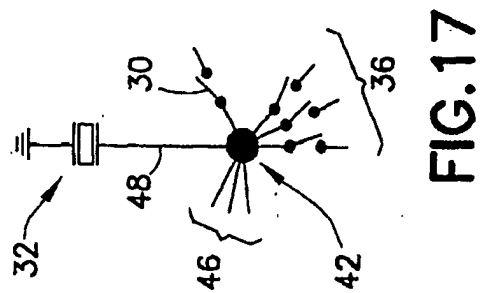
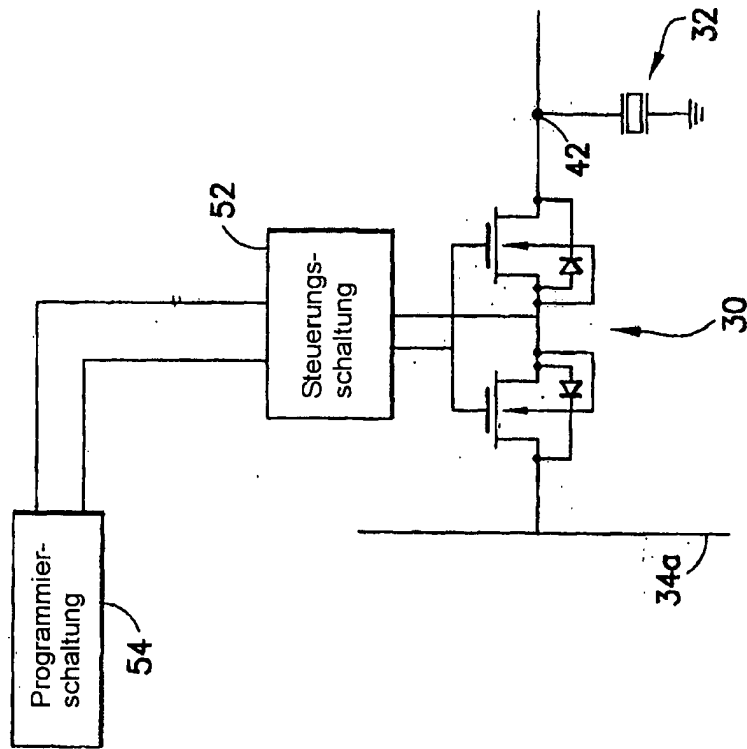


FIG.16



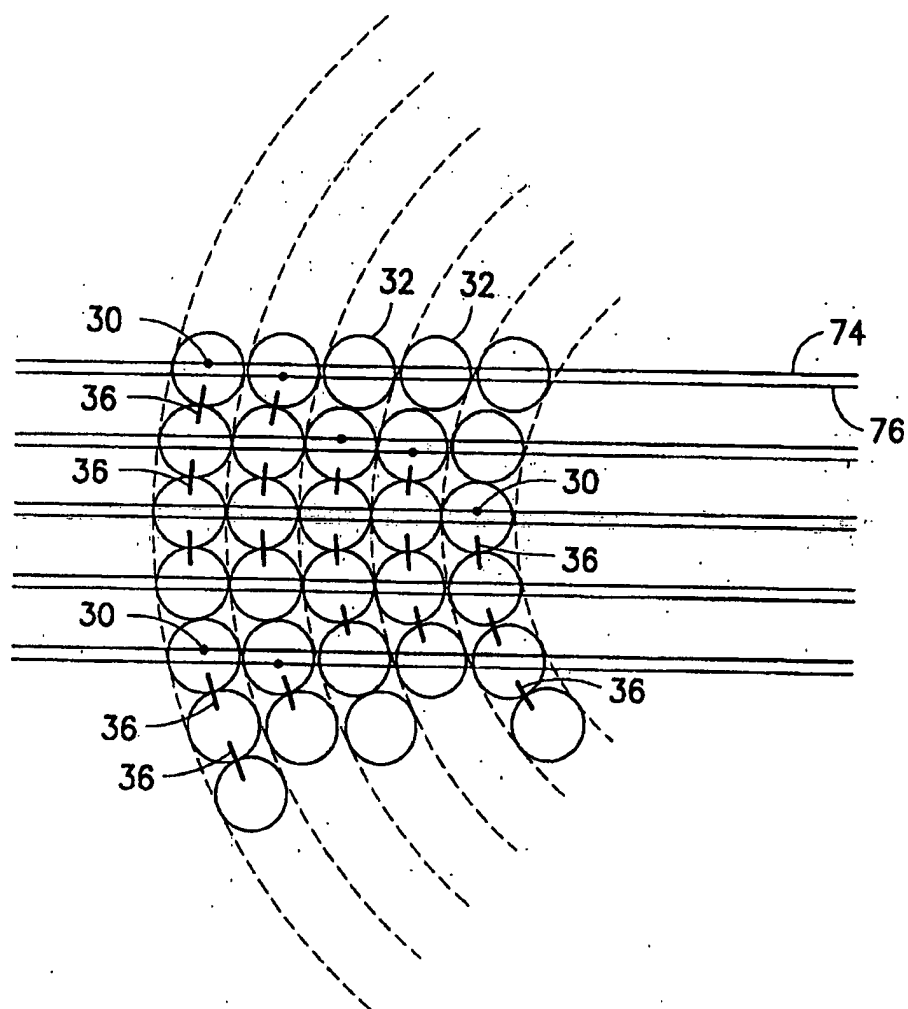


FIG.19

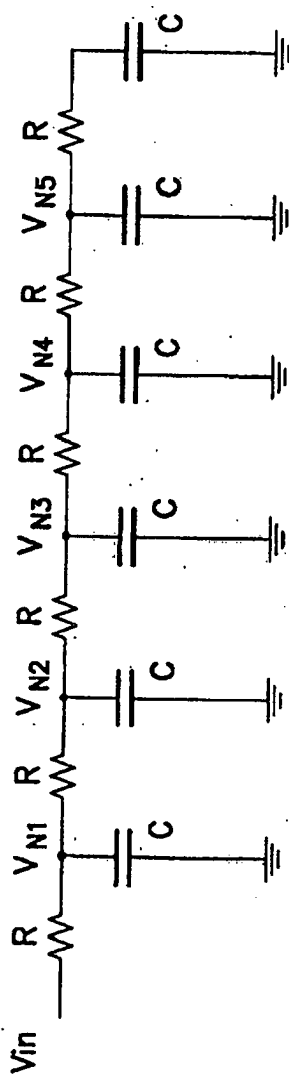


FIG.20

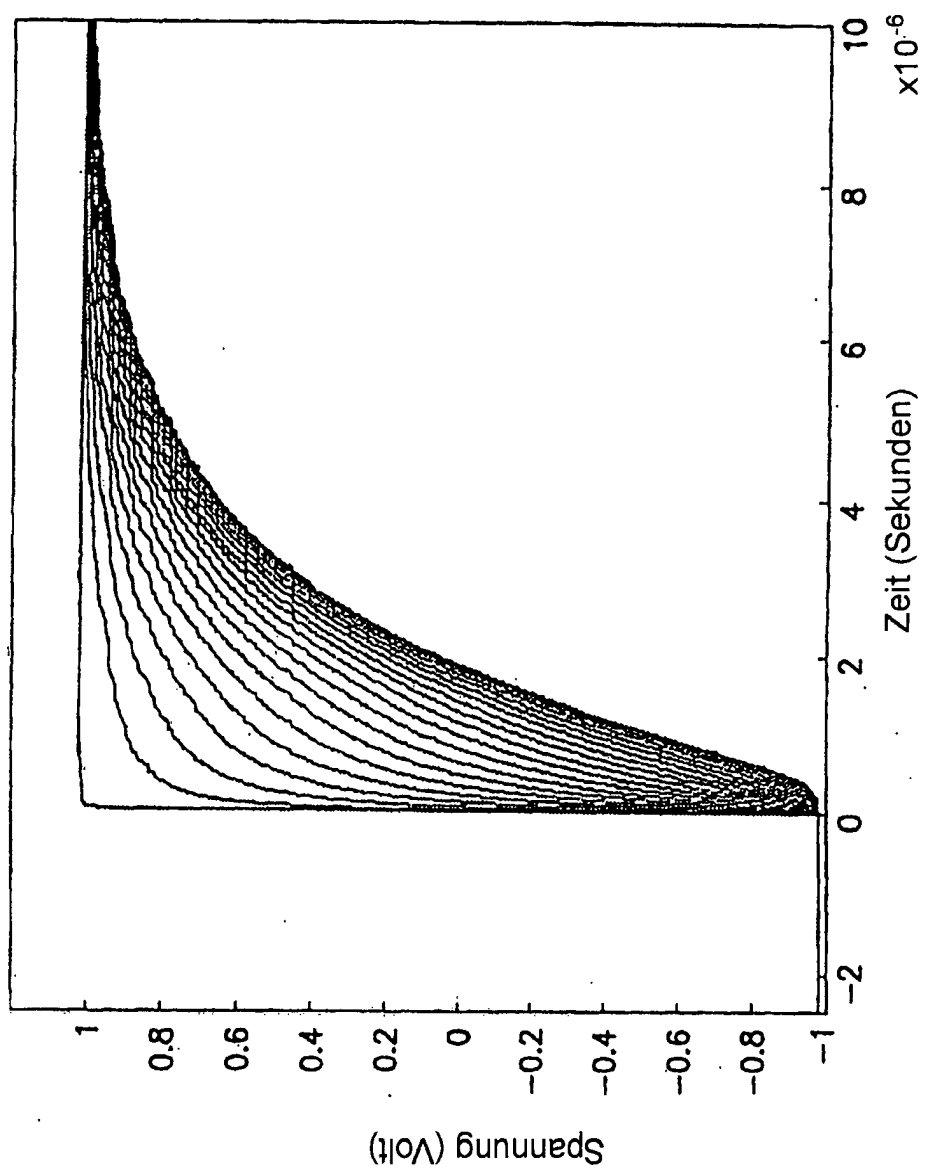


FIG.21

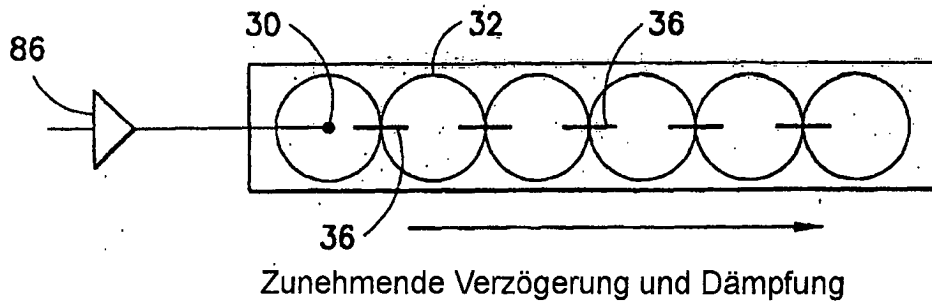


FIG. 22

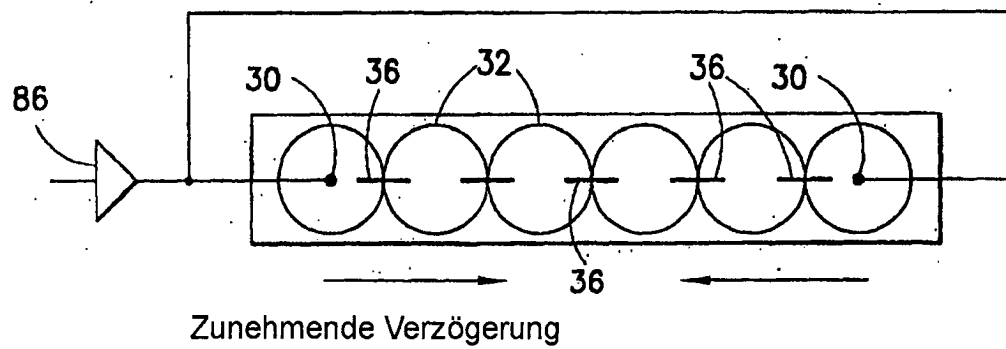


FIG. 23

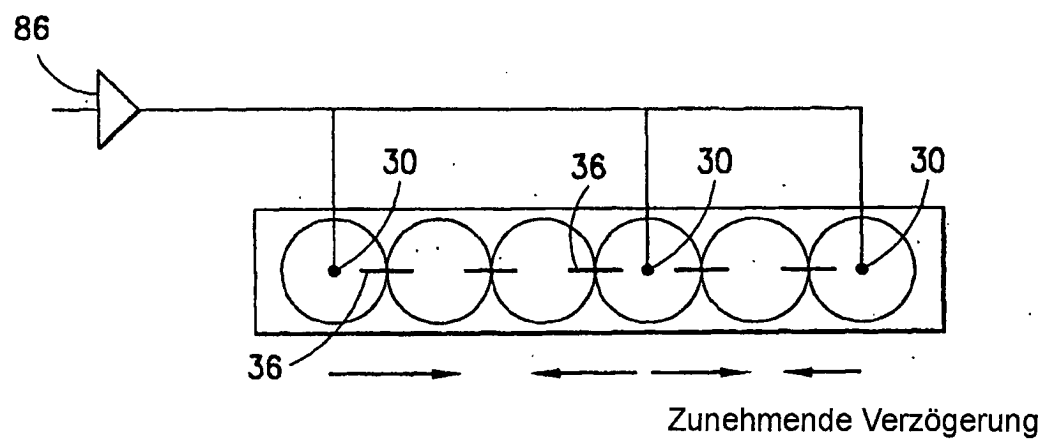


FIG. 24

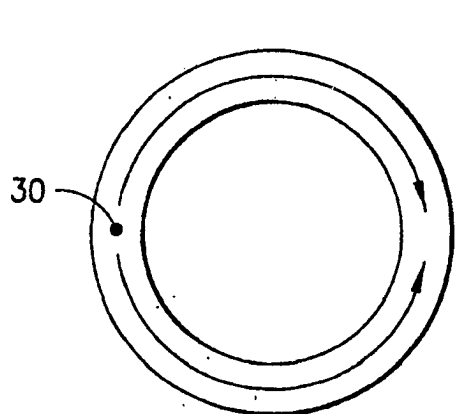


FIG.25

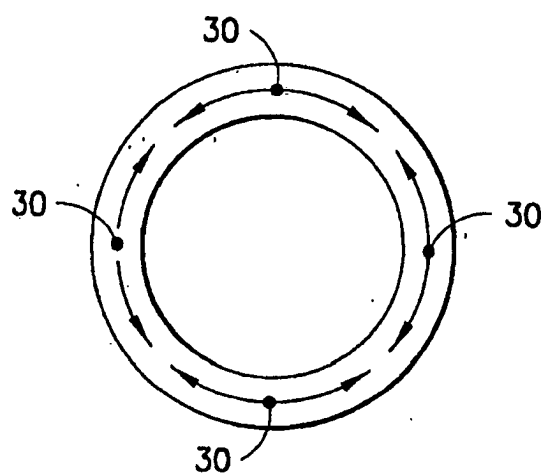


FIG.26

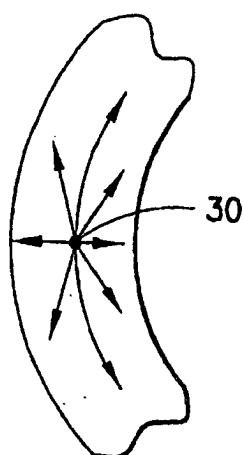


FIG.27

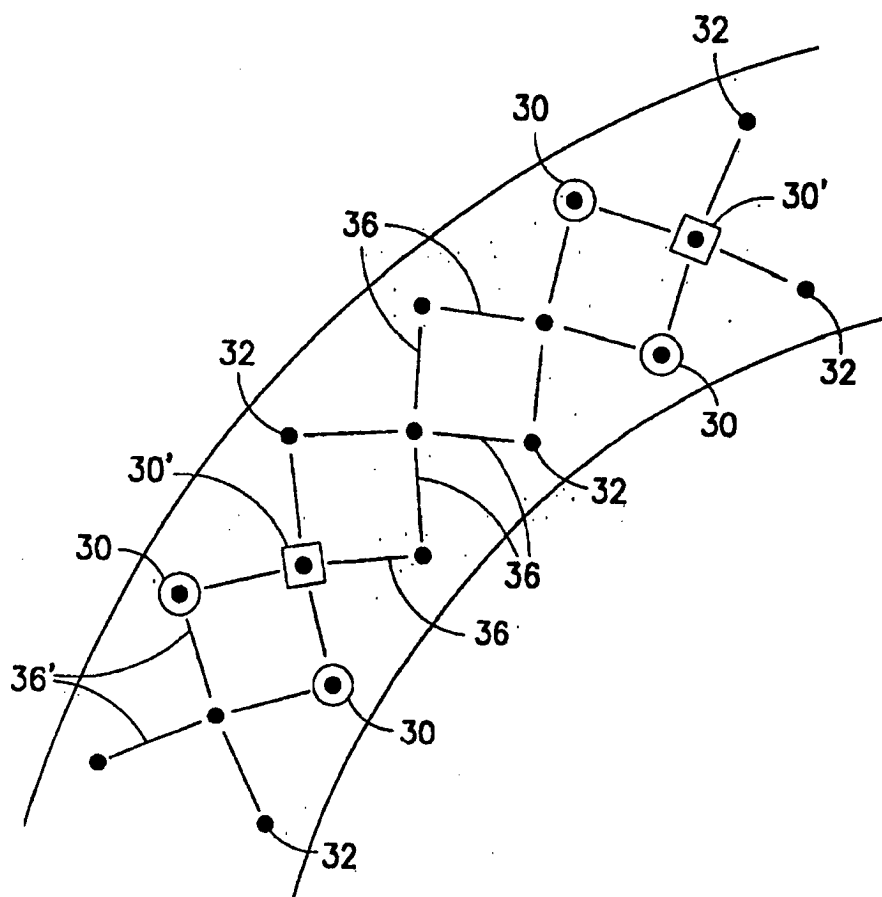


FIG.28