

(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 926/93

(51) Int.Cl.<sup>6</sup> : **B01D 43/00**

(22) Anmeldetag: 11. 5.1993

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 6.1994

(45) Ausgabetag: 25. 1.1995

(56) Entgegenhaltungen:

US-A 4983189 WO-A1 88/09210

(73) Patentinhaber:

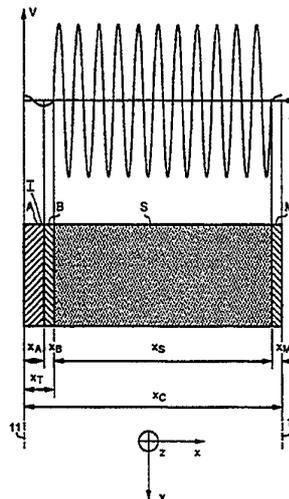
TRAMPLER FELIX DIPL.ING.  
A-2371 HINTERBRÜHL, NIEDERÖSTERREICH (AT).  
BENES EWALD DR.  
A-2362 BIEDERMANNSDORF, NIEDERÖSTERREICH (AT).

(72) Erfinder:

TRAMPLER FELIX DIPL.ING.  
HINTERBRÜHL, NIEDERÖSTERREICH (AT).  
BENES EWALD DR.  
BIEDERMANNSDORF, NIEDERÖSTERREICH (AT).  
BURGER WOLFGANG DIPL.ING.  
WIEN (AT).  
GRÖSCHL MARTIN DIPL.ING. DR.  
WIEN (AT).

(54) MEHRSCICHTIGER PIEZOELEKTRISCHER RESONATOR FÜR DIE SEPARATION VON SUSPENDIERTEN TEILCHEN

(57) In einer Flüssigkeit dispergiertes, partikelförmiges Material wird durch Erzeugung eines Ultraschall-Resonanzfeldes aus der Dispersion abgetrennt. In einer typischen Anordnung wird das Ultraschall-Resonanzfeld innerhalb eines mehrschichtigen, zusammengesetzten Resonatorsystems erzeugt, das aus einem Behälter mit der Dispersion (S), einem Transducer (T) und einem akustischen Spiegel (M) besteht. Alle Schichten sind parallel zueinander ausgerichtet. Es ergibt sich in der Dispersion eine viel stärkere Resonanzüberhöhung der Amplitude der akustischen Auslenkung als in allen anderen Schichten. Dieser Effekt wird durch Abstimmung der elektrischen Erregerfrequenz auf eine Resonanzfrequenz des mehrschichtigen, zusammengesetzten Resonators bei gleichzeitiger Fehlanpassung der Erregerfrequenz an Eigenfrequenzen des Transducers erreicht. Dadurch kommt es zu einer drastischen Reduktion der elektrischen Wirkleistung, die für den Separationsprozeß benötigt wird. Im allgemeinen ist die Einrichtung für alle Arten von Dispersionen verwendbar (feste, flüssige oder gasförmige dispergierte Phasen) und ist im speziellen für die Separation von Hydrosolen (Partikel in Wasser) und für die Abtrennung von biologischen Partikeln (Zellen) sehr wirkungsvoll.



Das Gebiet der Erfindung

Die Erfindung beschreibt eine Einrichtung zur Abtrennung von dispergierten Partikeln (fest, flüssig, oder gasförmig) in einer Flüssigkeit. Insbesondere ist die beschriebene Einrichtung in der Lage, dispergierte Partikel, die sich in physikalischen Kenngrößen (vor allem Kompressibilität, Schallgeschwindigkeit, Massendichte) von der Flüssigkeit unterscheiden, kontinuierlich abzutrennen, indem ein stehendes Ultraschall-Resonanzfeld in einem mehrschichtigen, zusammengesetzten Resonatorsystem, bestehend aus einem Transducer, einem Behälter und einem akustischen Spiegel erzeugt wird. Der Behälter beinhaltet die Flüssigkeit mit den dispergierten Partikeln, die abzutrennen sind. Die akustische Schallstrahlungskraft bewegt die Partikel zu den Knoten oder Bäuchen der stehenden Welle. Bei Ausnützung der sekundären, lateralen akustischen Kräfte kommt es zur Aggregation der Partikel und zur Ausfällung der Aggregate durch die Schwerkraft. Zahlreiche Gebiete moderner Technologien benötigen die Trennung von Partikeln von Flüssigkeiten. Solche Trennungsvorgänge gestatten entweder die Rückführung der Dispersionsflüssigkeit oder der partikelförmigen Substanz. Zum Beispiel beinhalten viele Prozessabwässer partikelförmige Substanzen. Im Bereich der Biotechnologie muß das Suspensionsmedium von der Biomasse getrennt werden. Die Einrichtung steht in direkter Konkurrenz zu Zentrifugen und Filtern, sowie zu konventionellen Sedimentationsverfahren unter Einsatz von Chemikalien.

Stand der Technik

In der jüngeren Vergangenheit wurden zahlreiche Bemühungen unternommen, akustische Trennungsvorgänge zu entwickeln, um konventionelle Methoden zu verbessern oder abzulösen. Die Erzeugung einer stehenden Welle innerhalb einer Flüssigkeit bewirkt die Ausbildung von Schallschnelleknoten und Bäuchen. Abhängig von Kompressibilität und Massendichte der Partikel werden diese durch die akustische Schallstrahlungskraft entweder in den Knoten oder Bäuchen angesammelt. (Die meisten festen und flüssigen Partikel sammeln sich in den Schallschnellebäuchen an.) Die Ebenen der Bauch- und Knotenbereiche sind normal zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle orientiert, und benachbarte Bäuche (beziehungsweise Knoten) weisen einen äquidistanten Abstand von einer halben Wellenlänge der akustischen Welle innerhalb der Flüssigkeit auf. Akustisch induzierte Aggregation und Koagulation von Partikeln innerhalb der Schallschnellebäuche ist vorwiegend durch Lehrbücher bekannt. Aus E. Skudrzyk. "Die Grundlagen der Akustik", Springer Verlag, Wien, 1954, S. 202-205, S. 807-825; L. Bergmann "Der Ultraschall und seine Anwendungen in Wissenschaft und Technik". Verlag hirtzel. Zürich. 1954; sowie K. Asai und N. Sasaki. "Schlammaufbereitung durch Ultraschall", Tagungsbericht zum 3. Internationalen Kongreß zur Steinkohlenaufbereitung, Institut National de l'Industrie Charbonniere, Brussels-Liege. 1958, folgt, daß die bei der Beschallung anzuwendende Frequenz am besten von der Größenordnung der sogenannten charakteristischen Frequenz  $f_0$  gewählt wird, die sich aus

$$f_0 = (3\eta)/(2\pi r^2) = 0.48\eta/r^2, \quad (1)$$

errechnet, wobei  $\eta$  die kinematische Viskosität und  $r$  den Radius der Partikel bezeichnet. In diesem Frequenzbereich kommt es zur maximalen Ausnutzung der Schallstrahlungskraft und zusätzlicher akustisch induzierter hydrodynamischer Wechselwirkungskräfte und Bernoulli-Kräfte, die innerhalb der Schallschnellebauchebenen normal zur primären Schallstrahlungskraft auf die Partikel wirken.

Die U.S. Pat. Nr. 4,055,491, beschreibt eine Einrichtung, die stehende Ultraschallwellen für die Flockung von kleinen Partikeln, wie Blut- oder Algenzellen, innerhalb der Schallschnellebäuche des akustischen Feldes in einer Flüssigkeit benützt und das Flockulat anschließend mit Hilfe der Schwerkraft sedimentiert. Die undefinierte Positionierung der Ultraschallquelle und daher niedrige Resonanzüberhöhung der Amplitude der akustischen stehenden Welle aufgrund undefinierter Resonanz-Randbedingungen führen zu hohen akustischen Energieverlusten aufgrund eines beträchtlichen Anteils laufender Wellen. Des weiteren kann der erzielte Trennungseffekt nur für den diskontinuierlichen Betrieb optimiert werden, da die beschriebene Einrichtung keinen laminaren Durchfluß gewährleisten kann. Die im U.S. Pat. Nr. 5,164,094 beschriebenen Einrichtungen verbessern zwar die Laminarität des Durchflusses. Jedoch geht auch hier ein beträchtlicher Teil akustischer Energie verloren, da die Erregerfrequenz des akustischen Feldes nicht entsprechend exakt definierter Resonanzbedingungen ab- und nachgestimmt wird.

Eine andere Einrichtung zur Trennung von Partikeln vom Dispersionsmedium wird im U.S. Pat. Nr. 4,523,682 beschrieben. Ein niederer akustischer Resonanzmode eines Behälters, der eine Dispersion beinhaltet, wird durch einen einzelnen, relativ kleinen Transducer angeregt. Der Transducer ist außen an einer Stirnfläche des länglichen geschlossenen Behälters befestigt, die Lage der Schallschnellebäuche der

angeregten stehenden Welle ist aber normal zur Oberfläche des Transducerplättchens (und zu den Stirnflächen des Behälters) orientiert. Die Anregung dieser lateralen Resonanz-Moden durch eine quasi punktförmige akustische Quelle unterscheidet sich prinzipiell von dem eindimensionalen Modell eines mehrschichtigen Resonators zur Beschreibung longitudinalen Resonanz-Moden. Der Anteil laufender Wellen  
 5 in longitudinaler Richtung ist hoch im Vergleich zur akustischen Energie der stehenden Wellen in lateraler Richtung. Die Dämpfung der laufenden Wellen bewirkt eine zusätzliche Temperaturerhöhung der Dispersion in Durchflußrichtung. Temperaturschwankungen innerhalb der Dispersion wirken sich negativ auf die Güte des Resonanzfeldes aus und führen zu einer Verlängerung der notwendigen Beschallungszeit.

Wegen der notwendigerweise langen Beschallungsdauern, um Aggregation und Sedimentation der  
 10 Partikel innerhalb der Schallschnellebauebenen zu erzielen, wurden verschiedene Methoden entwickelt, die Schallschnellebauebenen relativ zur Flüssigkeit zu bewegen, um den gewünschten Trennungseffekt alleine durch akustische Kräfte zu bewirken, ohne Aggregation und Sedimentation abwarten zu müssen. U.S. Pat. Nr. 4,673,512 beschreibt ein Verfahren, bei dem aufgrund von Interferenz ein stehendes akustisches Feld durch zwei gegenüberliegende Transducer erzeugt wird, die mit der selben Frequenz  
 15 angeregt werden. Durch kontrollierte Beeinflussung des Phasenwinkels zwischen den Erregersignalen der Transducer ist es möglich, Partikel, die in den Schallschnellebäuchen des Interferenzfeldes gehalten werden, relativ zum Dispersionsmedium zu verschieben. Dadurch sind nur relativ kurze Beschallungsdauern nötig, um den gewünschten Trennungseffekt zu erzielen. Der Nachteil dieses Verfahrens ist sein nicht-resonanter Charakter. Es muß mehr Energie aufgewendet werden, als für ein stehendes Resonanzfeld der gleichen Amplitude. Das Resultat ist hoher Leistungsverbrauch, um eine gegebene Mindest-Schallschnelleamplitude zu erzielen. Das gleiche Problem ergibt sich zwangsläufig im U.S. Pat. Nr. 4,759,775, welches nur eine andere Methode zur Erzeugung eines driftenden Interferenzfeldes beschreibt.

Das U.S. Pat. Nr. 4,877,516 beschreibt eine Einrichtung, um lokale Gradienten der Amplitude des stehenden Schallfeldes normal zur Ausbreitungsrichtung des Schalls zu bewegen. Dadurch werden die  
 25 Partikel innerhalb der Schallschnellebäuche durch die Bernoulli-Kraft mitgeführt, die örtlich direkt mit erwähnten Gradienten der Schallschnelleamplitude in Zusammenhang steht, und deren Krafrichtung parallel zu den Schallschnellebauebenen orientiert ist. Der Nachteil dieser Methode ist die Erfordernis eines mechanisch verschiebbaren Rasters, der akustische Schatten erzeugt um lokale Gradienten der Schallamplitude im stehenden Schallfeld zu erzielen.

Ein Verfahren zur schrittweisen Verschiebung der Schallschnellebauebenen eines stehenden akustischen Resonanzfeldes durch aufeinanderfolgende Anregung benachbarter Resonanz-Moden des Resonatorsystems wird in der WO-A1 90/05008 beschrieben. Obwohl Resonanzbedingungen in manchen der beschriebenen Ausführungsvarianten erfüllt werden, sind akustisch induzierte Energieverluste in Kauf zu nehmen, da die Erregerfrequenz des Resonators bisher immer in der Nähe der Eigenfrequenz des  
 35 Transducers gewählt wurde.

#### Definitionen

Um Mißverständnisse während des Vergleichs der Beschreibung der vorliegenden Erfindung mit dem  
 40 Stand der Technik zu vermeiden, ist es zweckmäßig, folgende Definitionen einzuführen:

*Akustische Teilchen* sind die Volumenelemente der akustischen Kontinuums-Theorie und dürfen nicht mit den dispergierten Partikeln verwechselt werden. *Die Schallschnelle  $V$*  ist die zeitliche Ableitung der periodischen Auslenkung der akustischen Teilchen aufgrund der entsprechenden Schallwelle.

*Eindimensionale* Behandlung von zusammengesetzten Resonatoren bedeutet, das ein angenähertes Modell  
 45 zur Beschreibung herangezogen wird, wobei alle Größen als nur von einer Dimension abhängig angenommen werden. (Vergleiche, z. B.: H. Nowotny, E. Benes, und M. Schmid, J. Acoust. Soc. Am. 90 (3), September 1991). Diese Dimension fällt in dieser Beschreibung immer mit der longitudinalen Richtung zusammen.

Die Bezeichnung *Schicht* wird sehr allgemein verwendet. Sogar die Flüssigkeit, in der die Partikel  
 50 dispergiert sind, wird als Schicht bezeichnet, weil nur eine Dimension des Flüssigkeitsvolumens wesentlich für die Beschreibung des zusammengesetzten Resonators entsprechend der Erfindung ist. Diese wesentliche, die Resonanzfrequenz bestimmende Dimension ist gewöhnlich, jedoch nicht notwendigerweise, die Dickendimension der Schicht. Die x-Achse des Koordinatensystems fällt in dieser Beschreibung immer mit dieser wesentlichen Dimension zusammen. Weil die y- und z- Dimensionen der Schichten keine Bedeutung  
 55 haben (eindimensionale Behandlung), wird einfach die Bezeichnung *Schichtdimension* für die wesentliche, die Resonanzfrequenz bestimmende Dimension des entsprechenden Teils des Resonators verwendet.

*Aktive Schichten* bestehen aus piezoelektrischem Material, *passive Schichten* bestehen aus nicht-piezoelektrischem Material.

Der *Transducer* ist im einfachsten Fall eine einfache Schicht bestehend aus einem piezoelektrischen Material. Aus vielen Gründen ist es vorteilhaft, mehrere piezoelektrische Plättchen auf einer oder beiden Seiten mit passiven, elektrisch isolierenden Trägerschichten zu verkleben oder akustisch zu koppeln. Entsprechend der Erfindung können auch zusätzliche Transformations- oder (Unter-) Schichten verwendet werden. Als Transducerschicht selbst wird im allgemeinsten Fall der Verbund aller Schichten (aktiv und passiv) definiert, die von jenen festen Schichten begrenzt werden, die entweder mit der den Resonator umgebenden Luft oder der Dispersionsschicht in Kontakt stehen. Der *Phasenwinkel*  $\phi$  ist der räumliche Phasenwinkel der Schallschnelle  $V$  innerhalb einer bestimmten Schicht zwischen den begrenzenden Oberflächen

$$\phi = 2\pi \cdot f_e \cdot x/v \quad (II)$$

wobei  $f_e$  die elektrische Erregerfrequenz,  $x$  die die Resonanzfrequenz bestimmende Abmessung der entsprechenden Schicht und  $v$  die (Phasen-) Schallgeschwindigkeit innerhalb dieser Schicht darstellt. Der Gesamt-Phasenwinkel innerhalb eines Mehrschichtsystems ist die Summe der Phasenwinkel einer jeden einzelnen Schicht plus zusätzlicher Phasensprünge an den Grenzflächen zwischen benachbarten Schichten mit unterschiedlichen spezifischen akustischen Impedanzen.

*Harmonische Eigenfrequenzen* einer einfachen Schicht. Die harmonischen Resonanzfrequenzen oder harmonischen Eigenfrequenzen  $f_i$  einer Schicht sind durch

$$f_i = i \cdot (c/\rho)^{1/2} / (2 \cdot x) \quad (III)$$

definiert, wobei  $i$  die Nummer des entsprechenden harmonischen Resonanzmodes,  $x$  die die Resonanzfrequenz bestimmende Dimension,  $c$  die effektive elastische Konstante und  $\rho$  die Massendichte der entsprechenden Schicht darstellt.

Falls die Schicht aus einem piezoelektrischen Material mit Elektroden besteht, ist die effektive elastische Konstante in Gleichung (III) von der elektrischen Ladung zwischen den Elektroden abhängig. Durch die Grenzfälle von kurzgeschlossenen Elektroden oder offenen Elektroden werden entsprechend Serien- oder Parallelresonanzfrequenz bestimmt. Nur ein Satz von Eigenfrequenzen  $f_i$  mit ungeradzahlgiger Nummer  $i$  (ungeradzahlige Oberwellen) kann elektrisch angeregt werden.

*Quasiharmonische Eigenfrequenzen* eines Mehrschichtsystems (z. B. ein mehrschichtiger Transducer). Während die Obertonfrequenzen von einfachen Schichten als ganzzahlige Vielfache der Grundwellen-Eigenfrequenz angegeben werden können, sind die Oberton-Eigenfrequenzen eines Mehrschichtsystems normalerweise nicht so einfach beschreibbar. Aus diesem Grund werden die Eigenfrequenzen eines eindimensionalen zusammengesetzten Resonators auch manchmal "quasiharmonische Resonanzfrequenzen" genannt. (Vergleiche, z.B.: E. Benes, J. Appl. Phys., Vol. 56, Nr. 3, 1 August 1984). Für den Fall, daß eine Schicht eine dominierende Dimension aufweist (Dispersionsschicht), können jedoch die Eigenfrequenzen höherer Ordnung (d. h. hohe Obertöne) in erster Näherung auch als äquidistant bezeichnet werden. Weil ein Transducer entsprechend der Erfindung bevorzugt aus mehreren Schichten besteht stellt er für sich selbst einen mehrschichtigen Resonator dar. Für solche Transducer können die Eigenfrequenzen als jene Frequenzen definiert werden, für welche der Phasenwinkel  $\phi_T$  der Schallschnelle zwischen den äußersten Grenzflächen des Transducers, entlang der Dimension  $x_T$  des Transducers, ein ganzzahliges Vielfaches  $n$  der Zahl  $\pi$  wird. Nicht alle dieser mechanisch möglichen Resonanzfrequenzen sind piezoelektrisch anregbar. Die Anregbarkeit hängt nur von der entsprechenden akustischen Auslenkungskurve innerhalb der aktiven Schicht ab. Ist diese Kurve symmetrisch zur  $y,z$ -Ebene, so ist der Transducer mit der entsprechenden Frequenz nicht anregbar. Diese Definition der elektrischen Anregbarkeit von Eigenfrequenzen eines mehrschichtigen Transducers steht im Einklang mit den gemessenen Resonanzfrequenzen, für den Fall, daß der Transducer von Vakuum (oder Luft) umgeben ist und die Frequenz des erregenden Leistungsgenerators auf ein relatives Maximum der elektrischen Wirkeistungsaufnahme durch den Transducer abgestimmt wird. Wenn die Spannungsamplitude  $U_e$  des Hochfrequenzausganges des Leistungsgenerators konstant gehalten wird (sehr geringer Innenwiderstand des Generators), wird die sogenannte Serienresonanzfrequenz der Mehrschichtstruktur bestimmt. Wenn die Stromamplitude  $I_e$  des Hochfrequenzausganges des Leistungsgenerators konstant gehalten wird (sehr hoher Innenwiderstand des Generators), wird die sogenannte Parallelresonanzfrequenz der Mehrschichtstruktur bestimmt.

*Longitudinale Richtung* bedeutet die Richtung der Schichtdimension. Die longitudinale Richtung fällt mit der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle, die durch die Transducerschicht erzeugt wird, zusammen. Gemäß der Erfindung werden nur Resonanzmoden in longitudinaler Richtung angeregt. Daher wird die Richtung der stehenden resonanten Welle ebenfalls als longitudinale Richtung bezeichnet.

*Transversale Richtungen* sind Richtungen normal zur longitudinalen Richtung. Diese Richtungen fallen mit den Ebenen der Schallschnelleknoten und -bäuche zusammen.

Die *Spezifische akustische Impedanz*  $Z$  ist die akustische Impedanz pro Querschnittsfläche der entsprechenden Schicht.

5

### Beschreibung der Erfindung

Gemäß der bevorzugten Ausführungsvarianten, besteht das mehrschichtige, zusammengesetzte Resonatorsystem aus einem ebenen Transducer, einem Behälter, der die Dispersion beinhaltet, und einem  
 10 ebenen akustischen Spiegel. Alle diese Schichten sind akustisch gekoppelt, in longitudinaler Richtung angeordnet und parallel zueinander ausgerichtet. Der Transducer kann aus einer piezoelektrisch aktiven Schicht z. B. PZT (Blei-Zirkonat-Titanat) Keramiken oder Lithium-Niobat Monokristallen oder einer PVDF Schicht), und einer festen passiven Schicht als Trägerschicht der aktiven Schicht gebildet werden. Die Erfindung eignet sich, dispergierte Partikel, die Durchmesser zwischen  $1\ \mu\text{m}$  bis in den Millimeterbereich  
 15 aufweisen können, vom Dispersionsmedium abzutrennen. Bevorzugte Resonanzfrequenzen liegen entsprechend der akustischen und geometrischen Größen der Partikel zwischen 0.1 und 10 MHz.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe dienen erfindungsgemäß die Merkmale der Patentansprüche. Hauptzweck der Erfindung ist es, unter Minimierung der zugeführten elektrischen Wirkleistung und des Temperaturanstieges aufgrund von akustischen Dämpfungsverlusten ein Ultraschall-Resonanzfeld innerhalb  
 20 der Dispersionsschicht eines mehrschichtigen zusammengesetzten Resonators zu erzeugen, um Partikel von Flüssigkeiten abzutrennen und, falls gewünscht, der Wiederverwertung zuzuführen. Viele potentielle Anwendungen des Ultraschall-Separationsprozesses, speziell in der Biotechnologie, erfordern eine Separationsmethode, bei der allfällige Temperaturerhöhungen hinreichend niedrig ausfallen, sodaß es zu keiner thermisch induzierten Schädigung der Partikel kommt. Des weiteren hängt die Menge der akustisch  
 25 gespeicherten Energie im Resonanzfeld und somit die zur Erreichung des Separationseffektes notwendige Beschallungsdauer wesentlich von einer möglichst homogenen Temperaturverteilung ab. Grund hierfür ist die Abhängigkeit der Wellenlänge bei einer bestimmten Frequenz von der Temperatur; unerwünschte räumliche Temperaturgradienten in transversalen Richtungen resultieren in einen in transversalen Richtungen ortsabhängigen totalen Phasenwinkel der akustischen Welle zwischen Transducer und Spiegel. Definierte und konstante Phasenwinkel-Verteilung in transversalen Richtungen innerhalb des Resonatorsystems  
 30 ist jedoch eine Grundbedingung für die Aufrechterhaltung von Resonanzfeldern hoher Güte in longitudinaler Richtung.

Das Resultat dieser Erfindung ist die Minimierung der charakteristischen Verlustzahl  $R = W_e/E_S = P_e \cdot \tau_{Cj}/E_S$ . Die Verlustzahl  $R$  ist hiermit definiert als Verhältnis zwischen elektrischer Wirkenergieaufnahme  
 35  $W_e$  (pro Schwingungsperiode  $\tau_{Cj} = 1/f_{Cj}$ ) des zusammengesetzten Resonatorsystems und der akustisch gespeicherten Blindenergie  $E_S$  des Resonanzfeldes innerhalb der Dispersionsschicht.  $f_{Cj}$  ist dabei die angeregte quasiharmonische Resonanzfrequenz des zusammengesetzten Resonators.  $P_e$  beschreibt die elektrische Wirkleistungsaufnahme des Systems. Die elektrische Wirkleistung  $P_e$  ist definiert als

$$40 \quad P_e = \frac{1}{2} U_e I_e \cos \phi, \quad (\text{IV})$$

wobei  $U_e$  und  $I_e$  die Amplituden von Spannung und Strom des elektrischen Erregersignals darstellen;  $\phi$  ist der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom des Erregersignales. Die gespeicherte akustische Energie  $E_S$  steht im direkten Zusammenhang mit den akustischen Kräften, die auf die Partikel wirken; der Eintrag  
 45 von elektrischer Wirkenergie  $W_e$  kompensiert akustische Energieverluste durch Dämpfung. Ein kleiner Anteil von  $W_e$  beruht auf dielektrischen Verlusten des Transducers, ist jedoch in bezug auf die Beschreibung der Erfindung irrelevant und wird im folgenden vernachlässigt.

Wir fanden, daß Wärmeentwicklung infolge akustischer Verluste des Transducers und des Spiegels minimiert werden kann, indem die Erregerfrequenz  $f_e$  des Leistungsgenerators auf eine akustische quasiharmonische Resonanzfrequenz des zusammengesetzten Resonatorsystems abgestimmt wird und gleichzeitig  
 50 die Anregung von Eigenfrequenzen  $f_{Ti}$  des Transducers oder Eigenfrequenzen des Spiegels  $f_{Mk}$  vermieden wird.

Die Konsequenz dieser Vorgangsweise ist die deutliche Reduzierung der charakteristischen Verlustzahl  $R$ . Der Vorteil einer bewußten Fehlanpassung der Erregerfrequenz an Eigenfrequenzen des Transducers ist  
 55 nicht offensichtlich, da im fehlangepaßten Fall das Resonatorsystem ein ziemlich unausgeprägtes elektrisches Resonanzverhalten aufweist. Im speziellen sind in der Ortskurvendarstellung des elektrischen Admittanzverhaltens des Resonatorsystems die als Kreise dargestellten Resonanzzustände viel schwächer ausgeprägt. Die Resonanzkreise erscheinen viel kleiner und liegen noch dazu abseits der reellen Achse.

Wegen dieses Verhaltens ist es im allgemeinen viel schwieriger, einen Leistungsgenerator zu entwickeln, der in der Lage ist, Resonanzen des kompletten Resonatorsystems abseits von Transducer-Eigenfrequenzen aufrechtzuerhalten. Aus diesem Grunde wurden in der Vergangenheit immer nur Resonanzen des Resonatorsystems angeregt, die im Bereich der ersten oder dritten quasiharmonischen Eigenfrequenz des Transducers gelegen sind.

Resonanzfrequenzen  $f_{Cj}$  des zusammengesetzten Resonatorsystems resultieren aus der Randbedingung an den begrenzenden, total reflektierenden Stirnflächen des Resonatorsystems, für stehende Wellen, wonach Maxima der Schallschnelleamplitude mit den äußersten, das Resonatorsystem begrenzenden Ebenen zusammenfallen müssen.

Daher muß in longitudinaler Richtung der totale Phasenwinkel  $\phi_C$  der akustischen Welle entlang der totalen Länge  $x_C$  des mehrschichtigen Resonatorsystems, einschließlich aller Schichten, ein ganzzahliges Vielfaches der Zahl  $\pi$  betragen. Fehlanpassung zwischen der elektrischen Erregerfrequenz  $f_e$  und den Eigenfrequenzen  $f_{Ti}$  der Transducerschicht kann entweder bei gegebener Erregerfrequenz  $f_e$  durch geeignete Wahl der Schichtdicke  $x_T$  des Transducers und dessen relativer Position im Mehrschicht-Resonator, oder durch direkte Wahl der Erregerfrequenz genügend abseits von irgendeiner der elektrisch anregbaren Eigenfrequenzen des Transducers gewährleistet werden. Gemäß der Erfindung ist der Frequenzabstand zu Transducer-Eigenfrequenzen ausreichend, wenn er größer als ein bestimmter minimaler Abstand ist. Dieser minimale Abstand ist gleich 10% dividiert durch die quasiharmonische Nummer  $i$  der entsprechenden elektrisch anregbaren Eigenfrequenz  $f_{Ti}$  des Transducers:

$$0 < f_e < [0.9 f_{T1}]; [1.1 f_{T1}] < f_e < [(1-0.1/2)f_{T2}]; [(1+0.1/2)f_{T2}] < f_e < [(1-0.1/3)f_{T3}]; [(1+0.1/3)f_{T3}] < f_e < [(1-0.1/4)f_{T4}]; [(1+0.1/4)f_{T4}] < f_e < (V)$$

Durch diese Fehlanpassung wird der Zusammenfall der Maxima der Schallschnelleamplitude mit beiden begrenzenden Ebenen des Transducers vermieden. Die charakteristische Verlustzahl  $R$  nimmt einen minimalen Wert an, wenn die Dicke  $x_T$  und relative Position der Transducerschicht in Bezug auf die Erregerfrequenz  $f_e$  derart gewählt wird, daß die Schallschnelleamplitude an der Grenzfläche zwischen Transducer und Dispersion einen verschwindenden Wert annimmt. In diesem bevorzugten Fall ist die Fehlanpassung zwischen der Erregerfrequenz  $f_e$  und allen anregbaren Eigenfrequenzen  $f_{Ti}$  des Transducers maximal, und der Wert der Erregerfrequenz  $f_e$  entspricht etwa dem Mittel eines der in Gleichung (5) definierten Intervalle.

Entsprechende Regeln sind für die Spiegelschicht gültig. Ihre Dicke  $x_M$  muß entsprechend gewählt werden, um Anregung einer ihrer Eigenfrequenzen  $f_{Mi}$  zu vermeiden. Die relative Position der Spiegelschicht ist dagegen durch Ihre Funktion als begrenzende Schicht des Mehrschicht-Resonators fixiert. Wie auch die Transducerschicht kann im allgemeinen der Spiegel aus mehreren Schichten bestehen.

Die Transducerschicht kann eine begrenzende Schicht des Resonatorsystems formen. Des weiteren kann die Transducerschicht aus einer piezoelektrischen (aktiven) Schicht, wie PZT (Blei-Zirkonat-Titanat,  $Pb(Ti,Zr)O_3$ ) Keramiken, oder Lithium-Niobat ( $LiNbO_3$ ) Monokristallen, oder PVDF (Polyvinylidenfluorid) Polymeren, und einer festen, nicht piezoelektrischen (passiven) Schicht bestehen. Die passive Schicht dient als Trägerschicht der aktiven Schicht. Aktive und passive Schicht haben definierte Dicken um Wärmeentwicklung auf Grund von akustischer Dämpfung zu minimieren. Beste Ergebnisse werden erzielt, wenn das Trägermaterial möglichst schwach dämpfend wirkt und eine spezifische akustische Impedanz  $Z_B$  aufweist, die etwa der spezifischen akustischen Impedanz  $Z_A$  der aktiven Schicht entspricht oder größer ist. Die Dicke  $x_A$  der aktiven Schicht entspricht bevorzugt etwa einem Phasenwinkel  $\phi_A$  der akustischen Welle von einem ungeradzahligem Vielfachen  $m$  der Zahl  $\pi$  innerhalb der aktiven Schicht. Die Dicke  $x_B$  der passiven Schicht des Transducers entspricht bevorzugt etwa einem Phasenwinkel  $\phi_B$  der akustischen Welle von einem ungeradzahligem Vielfachen  $m$  der Hälfte der Zahl  $\pi$  innerhalb der passiven Schicht. Werden diese Kriterien herangezogen, nimmt die Schallschnelleamplitude an der Transducer/Dispersion-Grenzschicht einen verschwindenden Wert an und die Randbedingung für die Anregung von Eigenfrequenzen  $f_{Ti}$  des Transducer ist größtmöglich verletzt. Wir fanden, daß daraus eine Minimierung von Energieverlusten durch Wärmeentwicklung aufgrund akustischer Dämpfung resultiert. Des weiteren wird bei dieser bevorzugten Anordnung - verglichen mit dem unerwünschten Fall einer Anregung von Transducer-Eigenfrequenzen - eine Abnahme der elektrischen Anregbarkeit vermieden.

Die Transducerschicht kann auch zwischen zwei Dispersionsschichten plaziert werden. In diesem Fall entspricht die Dicke  $x_A$  der aktiven Schicht bevorzugt etwa einem Phasenwinkel  $\phi_A$  der akustischen Welle von einem ungeradzahligem Vielfachen  $m$  der Zahl  $\pi$  innerhalb der aktiven Schicht. Die Dicke  $x_B, x'_B$  der passiven Schichten (falls vorhanden) entsprechen bevorzugt Phasenwinkeln  $\phi_B, \phi'_B$  der akustischen Welle von ungeradzahligem Vielfachen  $n, n'$  der Hälfte der Zahl  $\pi$  innerhalb der entsprechenden passiven

Schichten. Des weiteren werden die Dicken der jeweiligen an den Transducer grenzenden Dispersions-  
schichten derart gewählt, daß für eine gegebene Erregerfrequenz  $f_e$  die Schallschnelleamplitude an den  
Transducer/Dispersions-Grenzschichten verschwindende Werte annimmt und die Randbedingung für die  
Anregung von Eigenfrequenzen  $f_{Ti}$  des Transducer größtmöglich verletzt wird. Wir fanden, daß daraus eine  
5 Minimierung von Energieverlusten durch Wärmeentwicklung aufgrund akustischer Dämpfung resultiert. In  
einer bevorzugten Anordnung haben beide passive Schichten gleiche Dicken  $x_B$ ,  $x'_B$  und bestehen aus  
demselben Material.

Eine Anordnung von einer ungeraden Anzahl  $q$  von passiven Unterschichten mit einer jeweiligen Dicke  
 $x_{B,k}$  ( $k = 1, \dots, q$ ) erweist sich als ebenfalls vorteilhaft. Energieverluste zu minimieren, falls diese Unterschich-  
10 ten zwischen der aktiven Schicht und der Dispersionsschicht angeordnet sind. Die Dicke  $x_{B,k}$  ( $k = 1, \dots, q$ )  
jeder Unterschicht ist bevorzugt nach dem gleichen Phasenkriterium für den Phasenwinkel  $\phi_{B,k}$  innerhalb  
der Unterschicht zu wählen wie für den vorher beschriebenen Phasenwinkel  $\phi_B$  einer einzelnen passiven  
Schicht. Die Abfolge der spezifischen akustischen Impedanz der Unterschichten muß zwischen hohen  
Werten (vergleichbar mit dem Wert der aktiven Schicht) und niedrigen Werten (vergleichbar mit dem Wert  
15 der Dispersion) alternieren. Die äußersten Unterschichten müssen jedoch hohe Werte aufweisen. In einer  
weiteren Ausführungsvariante können niederimpedante Unterschichten auch von einer akustisch transparenten  
Flüssigkeit gebildet werden, die optional auch zirkulieren kann, um das Resonatorsystem zu thermostati-  
sieren.

Da die Resonanzfrequenzen  $f_{Cj}$  des Resonatorsystems mit der Temperatur der Dispersion und der  
20 Partikelkonzentration variieren, ist es wichtig, die Erregerfrequenz  $f_e$  wegen auftretender Resonanzfrequenz-  
Drifts nachzustimmen um konstante Bedingungen gemäß dem Ziel der Erfindung zu gewährleisten. Dies  
kann durch eine automatische Frequenz-Feinabstimmung (AFC) der Erregerfrequenz  $f_e$  erreicht werden,  
wobei als Kriterium für Resonanz ein relatives Maximum der elektrischen Wirkleistungsaufnahme  $P_e$  des  
Resonatorsystems herangezogen wird.

Eine weitere Möglichkeit, die Erregerfrequenz  $f_e$  auf bevorzugte Resonanzfrequenzen  $f_{Cj}$  abzustimmen,  
besteht in der Implementierung einer piezoelektrisch aktiven Schicht (wie zum Beispiel PZT Keramiken,  
Lithium-Niobat Monokristallen oder einer PVDF Schicht) in die Spiegelschicht oder in ihrer gänzlichen  
Ausführung als aktive Schicht. Relative Maxima der Amplitude des akustisch induzierten, elektrischen  
Signals an den Elektroden der aktiven Schicht dienen hierbei als Kriterium für resonante Anregung des  
30 Resonatorsystems..

Analog zu den Schichtdickenkriterien eines Mehrschicht-Transducers, müssen die Schichtdicken der  
aktiven und passiven Schicht eines zusammengesetzten Spiegels vorteilhafterweise so gewählt werden; daß  
für eine gegebene Erregerfrequenz  $f_e$  die Schallschnelleamplitude an der Spiegel/Dispersions-Grenzschicht  
einen verschwindenden Wert annimmt und die Resonanzbedingung für die Anregung von Eigenfrequenzen  
35  $f_{Mk}$  des Spiegels größtmöglich verletzt ist. Wir fanden, daß daraus eine Minimierung der Energieverluste  
durch Wärmeentwicklung aufgrund akustischer Dämpfung resultiert.

Analog zu den beschriebenen passiven Unterschichten des Transducers können passive Unterschichten  
auch Teil eines zusammengesetzten Spiegels sein oder diesen zur Gänze formen. Eine Anordnung von  
einer ungeraden Anzahl  $k$  von passiven Unterschichten mit einer jeweiligen Dicke  $x_{B,k}$  ( $k = 1, \dots, q$ ) kann  
40 verwendet werden, um Energieverluste zu minimieren, falls diese Unterschichten zwischen der aktiven  
Schicht (falls vorhanden) des Spiegels und der Dispersionsschicht angeordnet sind. Die Dicke  $x_{B,k}$  ( $k =$   
 $1, \dots, q$ ) jeder Unterschicht ist bevorzugt nach dem gleichen Phasenkriterium für den Phasenwinkel  $\phi_{B,k}$   
innerhalb der Unterschicht zu wählen wie für den vorher beschriebenen Phasenwinkel  $\phi_B$  einer einzelnen  
passiven Schicht. Die Abfolge der spezifischen akustischen Impedanz der Unterschichten muß zwischen  
45 hohen Werten (vergleichbar mit dem Wert der aktiven Schicht) und niedrigen Werten (vergleichbar mit dem  
Wert der Dispersion) alternieren. Die äußersten Unterschichten müssen jedoch hohe Werte aufweisen.

#### Kurze Beschreibung der Abbildungen:

- 50 FIG.1 verdeutlicht die Interpretation des zusammengesetzten Resonators als mehrschichtiges, eindimen-  
sionales System und zeigt den Verlauf der resultierenden Schallschnelleamplitude für den Fall, daß die  
Schichtdicken entsprechend der Erfindung gewählt wurden.  
FIG.2 zeigt eine Ausführungsvariante von FIG.1 mit dem Transducer zwischen zwei Dispersionsschich-  
ten,  
55 FIG.3 zeigt eine Ausführungsform eines simplen Resonatorsystems,  
FIG.4 zeigt ein Resonatorsystem mit einer Wellenleiterschicht,  
FIG.5 zeigt den Querschnitt eines Resonatorsystems mit einem total reflektierendem Spiegel als  
Resonatorbegrenzung,

FIG.6 ist eine bevorzugte symmetrische Version des Resonators gemäß FIG.5,  
 FIG.7 zeigt ein Beispiel einer Transducerschicht entsprechend der Erfindung.

### Detaillierte Beschreibung der Ausführungsvarianten und zwei typische Dimensionierungsbeispiele

5

Um die wesentlichen Teile der Ausführungsvarianten zu betonen, sind alle Schichten mit Großbuchstaben benannt, während alle anderen Teile mit Zahlen gekennzeichnet sind.

Der untere Bereich von **FIG.1** zeigt schematisch die wesentlichen Teile und Abmessungen eines typischen eindimensionalen Resonators. Die Transducerschicht **T** an der linken Seite besteht bevorzugt aus einer piezoelektrisch aktiven Schicht **A** und einer passiven, elektrisch isolierenden Trägerschicht **B**. Die entsprechenden Schichtdicken sind mit  $x_T$ ,  $x_A$  und  $x_B$  bezeichnet. Der Transducer **T** ist akustisch mit der Dispersionsschicht **S**, die eine Dicke  $x_S$  aufweist, gekoppelt. Der Resonator wird durch die Spiegelschicht **M** mit einer Dicke  $x_M$  komplettiert. Weil das Resonatorsystem von Luft umgeben ist, die eine um einige Größenordnungen niedrigere spezifische akustische Impedanz aufweist als irgendein fester Körper, werden die den Resonator begrenzenden und letztlich reflektierenden Ebenen durch die nach außen gerichteten, ebenen Oberflächen **11** und **12** des Transducers und des Spiegels gebildet. Daher wird die totale Länge  $x_C$  des zusammengesetzten Resonatorsystems durch diese reflektierenden Ebenen **11** und **12** definiert.

Der obere Bereich von **FIG.1** zeigt den örtlichen Verlauf der Schallschnelleamplitude  $V$  entlang der longitudinalen Richtung  $x$ . Falls die Dimensionierungen, die spezifischen akustischen Impedanzen der Schichten, wie auch die elektrische Erregerfrequenz  $f_e$  gemäß der Erfindung gewählt werden, sind die Amplitudenmaxima in der Dispersion, wie auch dargestellt, viel größer als die Amplitudenmaxima in den anderen Schichten. **FIG.1** gibt dieses Amplitudenverhältnis nur schematisch wieder. Das quantitative Amplitudenverhältnis der stehenden Welle zwischen der Dispersion und dem Transducer ist normalerweise größer als in **FIG.1** angedeutet.

Der untere Bereich von **FIG.2** zeigt schematisch die wesentlichen Teile und Abmessungen eines typischen eindimensionalen Resonators, wobei der Transducer **T** nicht nur an der rechten Seite an eine erste Dispersionsschicht **S** mit einer Dicke  $x_S$ , sondern auch an der linken Seite an eine zweite Flüssigkeitsschicht **S'** mit einer Dicke  $x'_S$  akustisch gekoppelt ist. Die zweite Flüssigkeitsschicht **S'** kann entweder aus der Dispersion oder nur aus dem Dispersionsmedium (ohne Partikel) bestehen. Der Transducer **T** besteht bevorzugt aus einer piezoelektrisch aktiven Schicht **A** und zwei passiven, elektrisch isolierenden Trägerschichten **B**. und **B'**. Die entsprechenden Schichtdicken sind mit  $x_T$ ,  $x_A$ ,  $x_B$  und  $x_{B'}$  bezeichnet. Der Resonator wird am rechten Rand durch eine erste Spiegelschicht **M** mit einer Dicke  $x_M$  und am linken Rand und durch eine zweite Spiegelschicht **M'** mit einer Dicke  $x'_M$  komplettiert. Weil das Resonatorsystem von Luft umgeben ist, die eine um einige Größenordnungen niedrigere spezifische akustische Impedanz aufweist als irgendein fester Körper, werden die den Resonator begrenzenden und letztlich reflektierenden Ebenen durch die nach außen gerichteten, ebenen Oberflächen **11** und **12** der Spiegel **M'** und **M** gebildet. Daher wird die totale Länge  $x_C$  des zusammengesetzten Resonatorsystems durch diese reflektierenden Ebenen **11** und **12** definiert.

Der obere Bereich von **FIG.2** zeigt den örtlichen Verlauf der Schallschnelleamplitude  $V$  entlang der longitudinalen Richtung  $x$ . Falls die Dimensionierungen, die spezifischen akustischen Impedanzen der Schichten, wie auch die elektrische Erregerfrequenz  $f_e$  gemäß der Erfindung gewählt werden, sind die Amplitudenmaxima in der Dispersion, wie auch dargestellt, viel größer als die Amplitudenmaxima in den anderen Schichten.

**FIG.3** zeigt die Ausführung eines einfachen Resonators. In diesem Beispiel ist die piezoelektrisch aktive Schicht in  $y$ -Richtung durch drei piezokeramische, nebeneinander angeordnete Plättchen oder Scheiben **A1**, **A2**, **A3** von gleicher Dicke  $x_A$  geformt. Die Plättchen **A1**, **A2**, **A3** schwingen akustisch parallel zueinander (in Phase erregt) und sind elektrisch in Serie geschaltet. Die Plättchen **A1**, **A2**, **A3** sind auf eine passive Trägerschicht **B** (zum Beispiel Glas oder  $Al_2O_3$ -Keramik) mit der Dicke  $x_B$  geklebt und können in guter Näherung als eine kontinuierliche Schicht **A** mit der Dicke  $x_A$  behandelt werden. Die Durchflußrichtung **6,7** der Dispersion **S** fällt in Richtung  $y$ . Die dispergierten Partikel werden durch die Schallstrahlungskraft in longitudinaler Richtung zu den Schallschnellebäuchen bewegt, wo die dispergierten Partikel agglomerieren. Die Agglomerate werden von der Schwerkraft in Richtung  $z$  hinuntergezogen. (Beschleunigte Sedimentation durch akustisch stimulierte Koagulation.)

Die Trägerschicht **B** und die Spiegelschicht **M** dienen gleichzeitig als Wände des Dispersionsbehälters. Die im Querschnitt rechteckigen Einfluß- **1** und Ausflußöffnungen **2** schließen knapp an die Trägerschicht **B** und die Spiegelschicht **M** durch Gummistreifen **4** und **4'** (Viton®) an. Die Distanz  $x_B + x_S + x_M$  wird genau durch Distanzhalter **5** und **5'** und die Flansche **3**, **3'** vorgegeben.

## AT 398 707 B

Die wesentlichen Dimensionierungen von zwei Resonatoren gemäß der Erfindung werden beispielsweise wie folgt vorgenommen:

Für biologische Zellen mit Durchmessern in der Größenordnung von  $10\ \mu\text{m}$  ergibt sich der passende Bereich der Erregerfrequenz aus Gleichung (I) typisch um 2 MHz. Als Standard-Piezokeramiken wurden  
 5 gewählt:

| Piezoelektrisch aktive Schicht <b>A</b> :                         |  |
|---|--|
| Material:   | PZT Blei-Zirkonat-Titanat, $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$<br>Piezokeramiken (Hoechst Sonox P4) |
| Massendichte:   | $\rho_A = 7800\ \text{kg/m}^3$   |
| Effektive Schallgeschwindigkeit bei kurzgeschlossenen Elektroden: | $v_A = 3950\ \text{m/s}$   |
| Spezifische akustische Impedanz:                                  | $Z_A = 30.8 \cdot 10^6\ \text{kg/m}^2\text{s}$   |
| Dicke:  | $x_A = 1\ \text{mm}$   |

Die Grundwellen-Serienresonanzfrequenz der aktiven Schicht kann aus Gleichung (III) bestimmt werden:  $f_A = 1.97\ \text{MHz}$ . Die Serienresonanzfrequenz ist relevant, weil der Ausgang des Leistungsgenerators G  
 20 gewöhnlich einen geringen Innenwiderstand aufweist. Sechs ( $2 \times 3$ ) quadratische Plättchen mit Oberflächenabmessungen von  $25\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$  sind an die passive Schicht B geklebt (vgl. auch Fig.7), die Dicke  $x_B$  der passiven Schicht entspricht einer der zur Verfügung stehenden Standard-Glasstärken:

| Piezoelektrisch passive Schicht <b>B</b> : |  |
|--|--|
| Material:                                  | Tempax Glas                                  |
| Massendichte:                              | $\rho_B = 2200\ \text{kg/m}^3$               |
| Schallgeschwindigkeit:                     | $v_B = 5430\ \text{m/s}$                     |
| Spezifische akustische Impedanz:           | $Z_B = 12 \cdot 10^6\ \text{kg/m}^2\text{s}$ |
| Dicke:                                     | $x_B = 2.8\ \text{mm}$                       |

Die Resonanzfrequenzen des Zweischicht-Transducers in Luft kann gemessen oder berechnet werden (E. Benes, J. Appl. Phys., Vol. 56; Nr. 3, 1 August 1984). Die ersten vier quasiharmonischen Eigenfrequenzen sind:  
 35

$$f_{T1} = 573500\ \text{Hz}, f_{T2} = 1371400\ \text{Hz}, f_{T3} = 1958120\ \text{Hz}, f_{T4} = 2546390\ \text{Hz}.$$

Entsprechend Gleichung (V) sind folgende Intervalle für die Wahl der Erregerfrequenz  $f_e$  vorteilhaft:

40  $0\ \text{Hz} < f_e < 516150\ \text{Hz}$  ;  $630850\ \text{Hz} < f_e < 1302830\ \text{Hz}$  ;  $1439970\ \text{Hz} < f_e < 1892849\ \text{Hz}$  ;  $2023391\ \text{Hz} < f_e < 2482730\ \text{Hz}$  ; ....

Die Dispersions-Schichtdicke  $x_S$  hängt im allgemeinen etwa von der benötigten Durchflußrate ab und wird in diesem Beispiel mit  $25\ \text{mm}$  gewählt:  
 45

| Dispersionssschicht <b>S</b> :   |   |
|----------------------------------|---|
| Material:                        | Hydrosol                                      |
| Massendichte:                    | $\rho_S = 1000\ \text{kg/m}^3$                |
| Schallgeschwindigkeit:           | $v_S = 1500\ \text{m/s}$                      |
| Spezifische akustische Impedanz: | $Z_S = 1.5 \cdot 10^6\ \text{kg/m}^2\text{s}$ |
| Dicke:                           | $x_S = 25\ \text{mm}$                         |

55

| Spiegelschicht M:                |  |
|----------------------------------|--|
| Material:                        | Tempax Glas                                  |
| Massendichte:                    | $\rho_M = 2200 \text{ kg/m}^3$               |
| Schallgeschwindigkeit:           | $v_M = 5430 \text{ m/s}$                     |
| Spezifische akustische Impedanz: | $Z_M = 12 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ |
| Dicke:                           | $x_M = 1.3 \text{ mm}$                       |

5  
10  
15  
Diese Parameter resultieren zu Resonanzfrequenzen  $f_{c_j}$  des Resonatorsystems in einem Abstand  $\Delta f_{c_j}$  von zirka 26 kHz. Daher liegen viele Resonanzfrequenzen in den bevorzugten Intervallen. Zum Beispiel ist die erste Resonanzfrequenz  $f_{c_j}$  im vierten Intervall 2035555 Hz, die zweite 2061024 Hz, die dritte 2087140 Hz; daher kann die Erregerfrequenz  $f_e$  zum Beispiel mit 2087140 Hz gewählt werden. Weil aber die Grundwellen-Eigenfrequenz des Spiegels 2088460 Hz beträgt, ist diese Wahl der Erregerfrequenz nicht genügend an die Spiegel-Eigenfrequenz fehlangepaßt. Daher muß die Spiegeldicke neu gewählt werden, zum Beispiel mit 1.8 mm.

20  
25  
Ein Design, das optimal im Hinblick auf das Ziel der Erfindung abgestimmt ist, verwendet, außer der passiven Schicht **B**, dieselben Schichten. Die spezielle Wahl der Dicke  $x_B$  soll einen Schallschnelleknoten an der Transducer/Dispersions-Grenzschicht erzwingen: Wenn die Erregerfrequenz  $f_e$  etwa gleich der Eigenfrequenz  $f_A$  der aktiven Schicht **A** ist, was optimale Anregbarkeit des Resonatorsystems garantiert, ist der Phasenwinkel  $\phi_A$  innerhalb der aktiven Schicht **A** gleich  $\pi$ . Wegen der Schallschnellebauch-Randbedingung Grenzschicht **11** zwischen aktiver Schicht **A** und der umgebenden Luft, und weil der Phasenwinkel  $\phi_A$  der Schallwelle innerhalb der aktiven Schicht **A** gleich  $\pi$  ist, muß die Dicke der passiven Schicht **B** derart gewählt werden, daß ihr Phasenwinkel  $\phi_B$  gleich  $\pi/2$  oder ein ungerades Vielfaches von  $\pi/2$  wird um einen Schallschnelleknoten an der Transducer/Dispersions-Grenzschicht zu gewährleisten. Setzt man diesen Phasenwinkel  $\pi/2$  in Gleichung (II) ein,

$$\phi_B = 2\pi \cdot f_e \cdot x_B / v_B = \pi/2$$

30  
so erlaubt dies die Berechnung von  $x_B$ . Falls das Resultat von  $x_B = 1.2 \text{ mm}$  für bestimmte Anwendungsgebiete mechanisch zu schwach ist, kann der dreifache Wert für die Dicke gewählt werden.

| Piezoelektrisch passive Schicht B: |  |
|------------------------------------|--|
| Material:                          | Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Keramik     |
| Massendichte:                      | $\rho_B = 3780 \text{ kg/m}^3$                 |
| Schallgeschwindigkeit:             | $v_B = 9650 \text{ m/s}$                       |
| Spezifische akustische Impedanz:   | $Z_B = 36.5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ |
| Dicke:                             | $x_B = 1.2 \text{ mm}$                         |

35  
40  
Die ersten zwei Eigenfrequenzen dieses Transducers sind:  $f_{T1} = 1335150 \text{ Hz}$ ,  $f_{T2} = 2866080 \text{ Hz}$ . Gemäß Gleichung (V) liegt die bevorzugte Erregerfrequenz  $f_e = 1.97 \text{ MHz}$  nun etwa in der Mitte des vorteilhaften Intervalls:  $1468665 \text{ Hz} < f_e < 2722776 \text{ Hz}$ .

45  
In diesem Beispiel ergibt sich die optimale Dicke des Spiegels aus Gleichung (II)

$$\phi_M = 2\pi \cdot x \cdot f_e / v_M = \pi/2;$$

zu  $x = 0.692 \text{ mm}$ . Da diese Dicke mechanisch zumeist zu schwach ist, kann die dreifache Dicke  $x_M = 2.07 \text{ mm}$  ebenfalls gewählt werden.

50  
Vergleichbar mit dem Zweischicht-Transducer **T** kann der Spiegel **M** ebenso aus einer aktiven Schicht **A** und einer passiven Schicht **B** bestehen, wobei dieselben Kriterien für die Wahl der jeweiligen Schichtdicken  $x_A$  und  $x_B$  berücksichtigt werden müssen. Die piezoelektrisch aktive Schicht des Spiegels liefert ein akustisch induziertes elektrisches Signal, daß dazu verwendet werden kann, die Erregerfrequenz  $f_e$  automatisch auf eine bevorzugte Resonanzfrequenz  $f_{c_j}$  des Resonatorsystems abzustimmen.

55  
**FIG.4** zeigt eine Erweiterung des Resonatorsystems beschrieben in **FIG.3**: Eine zusätzliche, mit einer Flüssigkeit von geringer akustischer Dämpfung (z.B. destilliertes Wasser) gefüllte Wellenleiterschicht **W** ist zwischen Transducer **T** und Dispersionsschicht **S** eingefügt, und mit Hilfe einer akustisch transparenten Trennschicht **F** von der Dispersion **S** getrennt. Die Dicke  $x_F$  der Schicht **F** ist, bezogen auf die Erregerfre-

quenz  $f_{\text{B}}$ , entweder Klein im Vergleich zu einem Viertel der Wellenlänge oder gleich der halben Wellenlänge oder einem Vielfachen der halben Wellenlänge für das Material der Trennschicht **F**. Im ersteren Fall können z.B. Polyethylen (Saran®) oder Polyethylenterephthalat (Mylar®) Folien mit einer Dicke von  $10\mu\text{m}$  als Schicht **F** verwendet werden. Im zweiten Fall kann die Schicht **F** aus einem beliebigen, akustisch transparenten Material bestehen, wobei allerdings die Schichtdickenwahl der Schicht **F** für ein Material, das eine möglichst ähnliche spezifische akustische Impedanz zu der der Dispersionsschicht **S** aufweist, weniger kritisch ist. In der Phasenwinkel-Nomenklatur korrespondiert im zweiten Fall die Schichtdicke  $x_{\text{F}}$  mit einem Phasenwinkel  $\phi_{\text{F}}$  gleich einem ganzzahligen Vielfachen von  $\pi$  innerhalb der akustisch transparenten Trennschicht **F**. Als dritte Möglichkeit kann die spezifische akustische Impedanz der Trennschicht etwa gleich der der Dispersion gewählt werden. Dieser Fall ist besonders vorteilhaft, da dann die Wahl der Schichtdicke  $x_{\text{F}}$  unkritisch ist. Geeignete Materialien wären z.B. TPX (Methylpenten) oder ABS (Acrylnitril Butadien Styrol). Die Wellenleiterschicht **W** dient als hochgütiger Resonatorteil, der die sehr inhomogene Nahfeldzone des Transducers **T** von der Separationszone **S** fernhält. Daher wird das Potential für akustisch induzierte Strömungen innerhalb der Dispersion **S** deutlich verringert. Dieses Resonatordesign wirkt verstärkt kühlend und erlaubt eine Thermostatisierung durch Zirkulation eines Kühlmittels durch den Wellenleiter **W** und einen Thermostaten. Für diesen Fall werden die Seitenwände **8** und **8'** mit Einfluß- und Ausflußöffnungen ausgestattet. Diese Resonatorversion verdeutlicht auch die Anwendbarkeit dieser Erfindung auf das sogenannte Driftwellenkonzept, das in einer anderen Patentanmeldung (WO-A1 90/05008) eingehend beschrieben wird. Während des Driftwellenprozesses wird das Resonatorsystem nicht nur auf einer bestimmten quasiharmonischen Resonanzfrequenz, sondern wiederholt auf fünf bis zwölf eng benachbarten Resonanzfrequenzen  $f_{\text{Cj}}$  unmittelbar hintereinander angeregt. Die dispergierten Partikel in der Dispersion **S** werden schrittweise gemäß der Bewegung der Schallschnellebäuche in longitudinaler Richtung  $x$  abgelenkt. Dies erlaubt die Aufteilung der Ausflußöffnung **2** in zwei Bereiche, einen **7** für das gereinigte Dispersionsmedium, den zweiten **7'** für die mit Partikeln hoch angereicherte Dispersion. Um akustisch verursachte Energieverluste zu minimieren, müssen gemäß der Erfindung die Erregefrequenzen des Driftwellenprozesses auf Resonanzfrequenzen in der Umgebung bevorzugter Resonanzfrequenzen  $f_{\text{Cj}}$  abgeglichen werden.

**FIG.5** zeigt den Querschnitt eines Resonatorsystems mit einem total reflektierendem Retroreflektor **R** als akustisch spiegelnde Begrenzung des Resonators. Dieser Retroreflektor **R** wird bevorzugt aus zwei Platten im rechten Winkel zueinander geformt. Die Orientierung der Durchflußrichtung der Dispersion **S** ist bevorzugt der Schwerkraft entgegengesetzt und fällt in **FIG.5** mit der z-Achse zusammen. Diese Resonatorversion ist besonders vorteilhaft, weil keine Seitenwände im Spiel sind, die im Hinblick auf ihre akustischen Einflüsse ignoriert werden müssen, um eine rein eindimensionale Beschreibung des Resonanzzustandes zu ermöglichen. Im Gegensatz dazu wird ein rein eindimensionales Verhalten von Resonatoren gemäß **FIG.3** und **FIG.4** oft nur dann erreicht, wenn die lateralen Dimensionierungen der Schichten viel größer sind als die longitudinalen, was manchmal nicht wünschenswert ist. Die akustischen Materialparameter des Retroreflektors **R** müssen so gewählt werden, daß die Bedingung für Totalreflexion an der Grenzschicht zwischen Dispersion **S** und Reflektor **R** für einen Einfallswinkel  $\alpha$  von  $45^\circ$  erfüllt ist. Totalreflexion an den Grenzschichten **12'**, **12''** zwischen Dispersion und Retroreflektor verhindert jegliche akustisch verursachte Energieverluste innerhalb des Reflektors **R**. Falls es sich bei dem Reflektor **R** um ein isotropes Material mit einer Scherwellen-Schallgeschwindigkeit größer gleich der 1,41-fachen Schallgeschwindigkeit für Longitudinalwellen in der Dispersion **S** handelt, ist die Bedingung für Totalreflexion an der Dispersion/Reflektor-Grenzschicht bei einem Einfallswinkel  $\alpha$  von  $45^\circ$  erfüllt. (Für den Fall, daß der Reflektor **R** aus einem anisotropen Material besteht, muß die niedrigere der beiden möglichen Scherwellengeschwindigkeiten größer gleich der 1,41-fachen Schallgeschwindigkeit für Longitudinalwellen in der Dispersion **S** sein.) Das heißt, die Schallwellen werden bereits an den Grenzschichten **12'**, **12''** zwischen Dispersion und Reflektor total reflektiert. Diese Bedingung ist für z.B. einer wäßrigen Dispersion und den Reflektormaterialien Molybden, rostfreier Stahl und sogar für Aluminium und anderen mehr erfüllt. Obwohl der Schallpfad entlang der Abschnitte  $x_{\text{S12}}$  und  $x_{\text{S22}}$  parallel zur y-Achse liegen, ist die Gesamtlänge eines jeden möglichen Schallpfades in der Dispersion durch

$$(x_{\text{S11}} + x_{\text{S12}} + x_{\text{S13}}) = (x_{\text{S21}} + x_{\text{S22}} + x_{\text{S23}}) = 2x_{\text{S}}$$

gegeben und gleich lang. Daher kann eine virtuelle, total reflektierende Ebene **12** eines äquivalenten eindimensionalen Resonators definiert werden, wobei die effektive Schichtdicke  $x_{\text{S}}$  der Dispersion **S** von lateralen Richtungen  $y$  und  $z$  unabhängig ist und alle Schichtdicken wieder gemäß der Erfindung gewählt werden können.

**FIG.6** ist eine bevorzugte symmetrische Version des in **FIG.5** beschriebenen Resonators. Der größte Vorteil dieses Design ist die Möglichkeit der Verwendung eines Rohres von quadratischem Querschnitt, das gleichzeitig den Behälter für die Dispersion bildet, und dessen Wände als Retroreflektoren des Resonatorsystems dienen. Jede der Dicken  $x_B$ ,  $x_{B'}$  der zwei passiven Schichten **B**, **B'**, wie auch die Dicke  $x_A$  der aktiven Schicht **A** sind gemäß der Erfindung zu wählen.

**FIG.7** zeigt eine detaillierte Abbildung eines zusammengesetzten Transducers. Dieselbe Abbildung beschreibt auch ein Spiegelsystem mit implementierter piezoelektrisch aktiver Schicht **A** gemäß der Erfindung. Im gezeigten Beispiel **FIG.7** wird die piezoelektrisch aktive Schicht **A** durch sechs piezoelektrische Plättchen **A1**, **A2**, **A3**, **A4**, **A5**, **A6** von gleicher Dicke  $x_A$  dargestellt. Diese Plättchen sind nebeneinander angeordnet und mit Elektroden bestückt. Die Plättchen schwingen akustisch parallel zueinander (in Phase erregt) und sind elektrisch in Serie geschaltet, um die elektrische Impedanz des Transducers an den Ausgang des Leistungsgenerators **G** anzupassen. Besagter Generator **G** liefert über die Klemmen **E1** und **E2** das elektrische Erregersignal mit einer Frequenz  $f_e$ .  $U_e$  und  $I_e$  sind die Amplituden der Erregerspannung bzw. des Erregerstromes. Die aktiven Plättchen sind auf eine elektrisch isolierende und piezoelektrisch passive Trägerschicht **B** der Dicke  $x_B$ , wie Glas oder  $Al_2O_3$ -Keramik, aufgeklebt und können in guter Näherung als eine kontinuierliche Schicht mit einer Dicke  $x_A$  behandelt werden. Die elektrischen Verbindungen zwischen den piezoelektrischen Plättchen werden durch Kupferfolien **I1**, **I2**, **I3**, **I4**, und Elektroden-schichten **J1**, **J2**, **J3**, gewährleistet. Die Dicke  $x_E$  der Elektroden-schichten **J1**, **J2**, **J3** korrespondiert mit einem Phasenwinkel  $\phi_E$  der akustischen Welle von weniger als  $1/16$  der Zahl  $\pi$ . Besagte Elektroden werden auf der der aktiven Schicht **A** zugewandten Seite der passiven Trägerschicht **B** aufgebracht. Die Dicken  $x_A$  und  $x_B$  haben entsprechend der Erfindung definierte Werte, um akustisch verursachte Energieverluste zu minimieren. Beste Resultate werden erreicht, wenn die spezifische akustische Impedanz  $Z_B$  der passiven Schicht **B** etwa der spezifischen akustischen Impedanz  $Z_A$  der piezoelektrisch aktiven Schicht **A** entspricht oder höher ist. Die Dicke  $x_A$  der aktiven Schicht **A** korrespondiert bevorzugt mit einem Phasenwinkel  $\phi_A$  der akustischen Welle gleich einem ungeradzahligem Vielfachen  $m$  der Zahl  $\pi$ , die Dicke  $x_B$  der passiven Schicht **B** korrespondiert bevorzugt mit einem Phasenwinkel  $\phi_B$  der akustischen Welle gleich einem ungeradzahligem Vielfachen  $n$  der Hälfte der Zahl  $\pi$ .

Eine Anordnung von einer ungeraden Anzahl  $q$  von passiven Unterschichten mit einer jeweiligen Dicke  $x_{B,k}$  ( $k = 1, \dots, q$ ) erweist sich als ebenfalls vorteilhaft, Energieverluste zu minimieren. Die Dicke  $x_{B,k}$  ( $k = 1, \dots, q$ ) jeder Unterschicht **Bk** ist bevorzugt nach dem gleichen Phasenkriterium für den Phasenwinkel  $\phi_{B,k}$  innerhalb der jeweiligen passiven Schicht **B** zu wählen wie für den vorher beschriebenen Phasenwinkel  $\phi_B$  einer einzelnen passiven Schicht **B**. Die Abfolge der spezifischen akustischen Impedanz der Unterschichten **Bk** muß zwischen hohen Werten ( $Z_{B,k} \geq Z_A, k \dots$  ungerade) und niedrigen Werten ( $Z_{B,k} < Z_A, k \dots$  gerade) alternieren. Die äußersten Unterschichten **B1** und **Bq** müssen jedoch hohe Werte aufweisen. In einer weiteren Ausführungsvariante können niederimpedante Unterschichten **Bk** ( $k \dots$  gerade) auch von einer akustisch transparenten Flüssigkeit gebildet werden, die optional auch zirkulieren kann, um das Resonatorsystem zu thermostatisieren.

### Patentansprüche

- Einrichtung zur Abtrennung dispergierter Partikel von einer Flüssigkeit durch Erzeugung eines resonanten Ultraschallfeldes innerhalb eines zusammengesetzten, mehrschichtigen Resonators, wobei besagte Schichten akustisch gekoppelt sind und in der Ausbreitungsrichtung ( $x$ ) der akustischen Welle durch zumindest einen Transducer (T), einen die Dispersion (S) beinhaltenden Behälter und einen akustischen Spiegel (M) gebildet werden, und der Transducer (T) durch einen elektrischen Leistungsgenerator (G) mit einer Hochfrequenz ( $f_e$ ) innerhalb der Halbwertsbreite einer charakteristischen quasiharmonischen Oberton-Resonanzfrequenz ( $f_{Cj}$ ) des Resonatorsystems erregt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dicke ( $x_T$ ) und relative Lage der Transducerschicht (T) so gewählt wird, daß die Erregerfrequenz ( $f_e$ ) außerhalb eines jeden Frequenzintervalls liegt, das durch eine untere und eine obere Grenzfrequenz definiert ist, wobei die untere Grenzfrequenz durch die jeweilige elektrisch anregbare, quasiharmonische Eigenfrequenz des Transducers ( $f_{Ti}$ ) minus dem Quotienten ( $f_{Ti}/10i$ ) aus besagter Eigenfrequenz ( $f_{Ti}$ ) und der zehnfachen quasiharmonische Nummer ( $i$ ) gegeben ist, und die obere Grenzfrequenz durch die jeweilige elektrisch anregbare, quasiharmonische Eigenfrequenz des Transducers ( $f_{Ti}$ ) plus dem Quotienten ( $f_{Ti}/10i$ ) aus besagter Eigenfrequenz ( $f_{Ti}$ ) und der zehnfachen quasiharmonischen Nummer ( $i$ ) gegeben ist.
- Einrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dicke ( $x_T$ ) und relative Lage der Transducerschicht (T) im Hinblick auf die Erregerfrequenz ( $f_e$ ) so gewählt wird, daß die Schallschnelle-

amplitude (V) an der Grenzschicht zwischen Transducer (T) und der Dispersion (S) einen verschwindenden Wert annimmt.

3. Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Transducer (T) mit der Dispersion (S) nur an einer Seite, der inneren Seite, in Kontakt ist, wobei die äußere Grenzschicht des Transducers (T) die erste, das Resonatorsystem begrenzende, reflektierende Ebene (11), und die äußere Grenzschicht des akustischen Spiegels (M) die zweite, das Resonatorsystem begrenzende, reflektierende Ebene (12) bilden.
4. Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Transducer (T) an beiden Seiten mit der Dispersion (S) in Kontakt ist, und zwei Spiegel (M, M') den Resonator begrenzen, wobei die äußere Grenzschicht des ersten Spiegels (M) die erste, das Resonatorsystem begrenzende, reflektierende Ebene (11), und die äußere Grenzschicht des zweiten Spiegels (M') die zweite, das Resonatorsystem begrenzende, reflektierende Ebene (12) bilden.
5. Einrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Transducer (T) aus einer, im weiteren kurz aktive Schicht genannten, piezoelektrischen festen Schicht (A) und einer, im weiteren kurz passive Schicht genannten, nicht-piezoelektrischen Schicht (B) besteht, wobei der Wert der Schichtdicke ( $x_A$ ) der aktiven Schicht (A) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_A$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, besagter Phasenwinkel ( $\phi_A$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (m) der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, der Wert der Schichtdicke ( $x_B$ ) der passiven Schicht (B) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_B$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, und besagter Phasenwinkel ( $\phi_B$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (n) der Hälfte der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, wobei die passive Schicht (B) aus einem Material mit einer spezifischen akustischen Impedanz  $Z_B$  vergleichbar mit der spezifischen akustischen Impedanz  $Z_A$  der aktiven Schicht (A), oder höher, gefertigt ist.
6. Einrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Transducer (T) aus einer, im weiteren kurz aktive Schicht genannten, piezoelektrischen, festen Schicht (A) und zwei, im weiteren kurz passive Schichten genannten, nicht-piezoelektrischen Schichten (B, B') besteht, die aktive Schicht (A) zwischen den passiven Schichten (B, B') positioniert ist, der Wert der Schichtdicke ( $x_A$ ) der aktiven Schicht (A) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_A$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, besagter Phasenwinkel ( $\phi_A$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (m) der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, der Wert der Schichtdicke ( $x_B$ ) der ersten passiven Schicht (B) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_B$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, besagter Phasenwinkel ( $\phi_B$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (n) der Hälfte der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, der Wert der zweiten Schichtdicke ( $x'_B$ ) der zweiten passiven Schicht (B') mit einem Phasenwinkel ( $\phi'_B$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, und besagter Phasenwinkel ( $\phi'_B$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (n') der Hälfte der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, wobei die passiven Schichten (B, B') bevorzugt gleiche Dicken ( $x_B, x'_B$ ) aufweisen, und die passiven Schichten (B, B') aus einem Material mit einer spezifischen akustischen Impedanz  $Z_B$  vergleichbar mit der spezifischen akustischen Impedanz  $Z_A$  der aktiven Schicht (A), oder höher, gefertigt sind.
7. Einrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die passive Schicht (B) des Transducers (T) eine Wand des Behälters bildet.
8. Einrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Spiegel (M) eine Wand des Behälters bildet.
9. Einrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Spiegel (M, M') gegenüberliegende Wände des Behälters bilden.
10. Einrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Spiegel (M) eine, im weiteren kurz aktive Schicht genannte, piezoelektrische feste Schicht (A) beinhaltet, und die Amplitude des zwischen den Elektroden der aktiven Schicht (A) produzierten elektrischen Signals ( $U_e$ ) als Kriterium verwendet wird, um die Erregerfrequenz ( $f_e$ ) des elektrischen Leistungsgenerators (G) auf eine quasiharmonische Resonanzfrequenz ( $f_{ci}$ ) des Resonators abzustimmen, indem ein relatives Maximum der Amplitude des elektrischen Signals ( $U_e$ ) angestrebt wird.

11. Einrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Wert der Schichtdicke ( $x_A$ ) besagter aktiven Schicht (A) des Spiegels (M) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_A$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, besagter Phasenwinkel ( $\phi_A$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (m) der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, die aktive Schicht (A) des Spiegels (M) akustisch mit einer, im weiteren kurz passive Schicht  
5 genannten, nicht-piezoelektrischen Schicht (B) gekoppelt ist, der Wert der Schichtdicke ( $x_B$ ) der passiven Schicht (B) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_B$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, und besagter Phasenwinkel ( $\phi_B$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen (n) der Hälfte der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, wobei die passive Schicht (B) aus einem Material mit einer spezifischen akustischen Impedanz  $Z_B$  vergleichbar mit der spezifischen akustischen Impedanz  $Z_A$  der aktiven Schicht (A), oder höher, gefertigt ist.
12. Einrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß die passive Schicht (B) des Transducers (T) eine Wand des Behälters bildet.
13. Einrichtung nach einem der Ansprüche 5, 6, oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß besagte aktive  
15 Schicht (A) durch eine mosaikähnliche Struktur von akustisch parallelen, runden, rechteckigen oder quadratischen piezoelektrischen Plättchen (A1, A2, A3, A4, A5, A6) mit gleicher Dicke ( $x_A$ ) gebildet wird und auf die piezoelektrisch passive Schicht (B) geklebt ist.
14. Einrichtung nach einem der Ansprüche 5, 6, 11 oder 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die  
20 piezoelektrischen Plättchen aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT:  $\text{Pb}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$ ) Keramiken oder Lithium-Niobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) Monokristallen bestehen.
15. Einrichtung nach einem der Ansprüche 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß besagte passive  
25 Schicht (B) eine elektrisch isolierende dielektrische Schicht ist, die Elektroden der piezoelektrischen Plättchen (A1, A2, A3, A4, A5, A6) zumindest teilweise durch auf die passive Schicht (B) aufgetragene Kontaktelektroden (J1, J2, J3) in Serie geschaltet sind, und die Dicke ( $x_E$ ) besagter Kontaktelektroden (J1, J2, J3) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_F$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, wobei besagter Phasenwinkel ( $\phi_F$ ) kleiner als ein Sechzehntel der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist.
- 30 16. Einrichtung nach einem der Ansprüche 5, 6, 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß die piezoelektrisch aktive Schicht (A) aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) Folie gebildet wird.
17. Einrichtung nach einem der Ansprüche 5, 6 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß die passive  
35 Schicht (B) aus einem ungeradzahligem Vielfachen (q) piezoelektrisch passiver Unterschichten besteht, der Wert der Schichtdicke ( $x_{B,k}$  [ $k = 1 \dots q$ ]) einer jeden Unterschicht mit einem Phasenwinkel ( $\phi_{B,k}$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, und besagter Phasenwinkel ( $\phi_{B,k}$ ) gleich einem ungeraden Vielfachen ( $n_k$ ) der Hälfte der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist, wobei die Abfolge der spezifischen akustischen Impedanzen der Unterschichten zwischen hohen Werten  $Z_{B,k} \geq Z_{A,k \dots \text{ungerade}}$  und niedrigen Werten ( $Z_{B,k} < Z_{A,k \dots \text{gerade}}$ ) alterniert, und die erste und die letzte Unterschicht dieser Abfolge hohe Werte  
40 ( $Z_{B,1} \geq Z_A$ ,  $Z_{B,q} \geq Z_A$ ) aufweisen.
18. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1, 2, 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Wirkleistungsaufnahme ( $P_e$ ) des Resonators als Kriterium zur Feinabstimmung der Erregerfrequenz ( $f_e$ ) des elektrischen Leistungsgenerators (G) auf eine quasiharmonische Resonanzfrequenz ( $f_{cj}$ ) des Resonators  
45 verwendet wird, indem mit Hilfe einer automatischen Frequenzkontrolle (AFC) ein relatives Maximum der Wirkleistungsaufnahme ( $P_e$ ) angestrebt wird.
19. Einrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine, durch eine Flüssigkeit gebildete,  
50 zusätzliche Wellenleiterschicht (W) zwischen der passiven Schicht (B) des Transducers (T) und der Dispersion (S) angeordnet wird, und diese Wellenleiterschicht (W) von der Dispersion (S) durch eine akustisch transparente Wand (F) getrennt ist.
20. Einrichtung nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Seitenwände besagter Wellenleiter-  
55 schicht (W) mit Einfluß- und Ausflußöffnungen ausgestattet sind und die Wellenleiter-Flüssigkeit (W) zirkuliert wird.
21. Einrichtung nach einem der Ansprüche 19 oder 20, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Erregerfrequenz ( $f_e$ ) wiederholt hintereinander auf fünf bis zwölf unmittelbar benachbarte Resonanzfrequenzen  $f_{cj}$

des Resonatorsystems abgestimmt wird.

22. Einrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein total reflektierender Retroreflektor (R) eine Begrenzung des Behälters bildet, besagter Retroreflektor (R) durch zwei im rechten Winkel zueinander stehenden Reflektorplatten (12', 12''), die 45° zur Richtung x der Schallausbreitung geneigt sind, gebildet wird, die akustischen Parameter des Materials des Retroreflektors (R) einen solchen Wert haben, daß die Bedingung für Totalreflexion für einen Neigungswinkel von 45° zwischen den Reflektorplatten (12', 12'') und der Richtung x der Schallausbreitung an den Grenzschichten zwischen der Dispersion (S) und den Reflektorplatten (12', 12'') erfüllt ist, die Durchflußrichtung der Dispersion parallel zu diesen Reflektorplatten (12', 12'') und normal (z) zu der longitudinalen Richtung (x) orientiert ist, und die virtuelle, total reflektierende Ebene (12) des äquivalenten eindimensionalen Resonators die effektive Schichtdicke ( $x_s$ ) der Dispersion (S) definiert.
23. Einrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei symmetrische, total reflektierende Retroreflektoren (R, R') gegenüberliegende Begrenzungen des Behälters bilden, die akustischen Parameter des Materials der Retroreflektoren (R, R') einen solchen Wert haben, daß die Bedingung für Totalreflexion an den Grenzschichten zwischen den jeweiligen Dispersionsbereichen (S, S') und Retroreflektoren (R, R') erfüllt ist, die Durchflußrichtung der Dispersion normal (z) zu der longitudinalen Richtung (x) orientiert ist, und die virtuellen, total reflektierenden Ebenen (11, 12) des äquivalenten eindimensionalen Resonators die jeweiligen effektiven Schichtdicken ( $x_s$ ) der Dispersionsbereiche (S, S') definieren.
24. Einrichtung nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Wert der Dicke ( $x_F$ ) der akustisch transparenten Wand (F) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_F$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, und besagter Phasenwinkel ( $\phi_F$ ) bezogen auf die Erregerfrequenz ( $f_e$ ) viel kleiner als die Hälfte der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist.
25. Einrichtung nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Wert der Dicke ( $x_F$ ) der akustisch transparenten Wand (F) mit einem Phasenwinkel ( $\phi_F$ ) der Schallschnelleamplitude (V) korrespondiert, und besagter Phasenwinkel ( $\phi_F$ ) bezogen auf die Erregerfrequenz ( $f_e$ ) möglichst genau gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Zahl Pi ( $\pi$ ) ist.
26. Einrichtung nach einem der Ansprüche 19, 24 oder 25, **dadurch gekennzeichnet**, daß die akustisch transparente Wand (F) aus einem Material hergestellt ist, dessen spezifische akustische Impedanz ( $Z_F$ ) möglichst genau gleich der spezifischen akustischen Impedanz ( $Z_W$ ) der Wellenleiter-Flüssigkeit (W) ist.

Hiezu 7 Blatt Zeichnungen

40

45

50

55

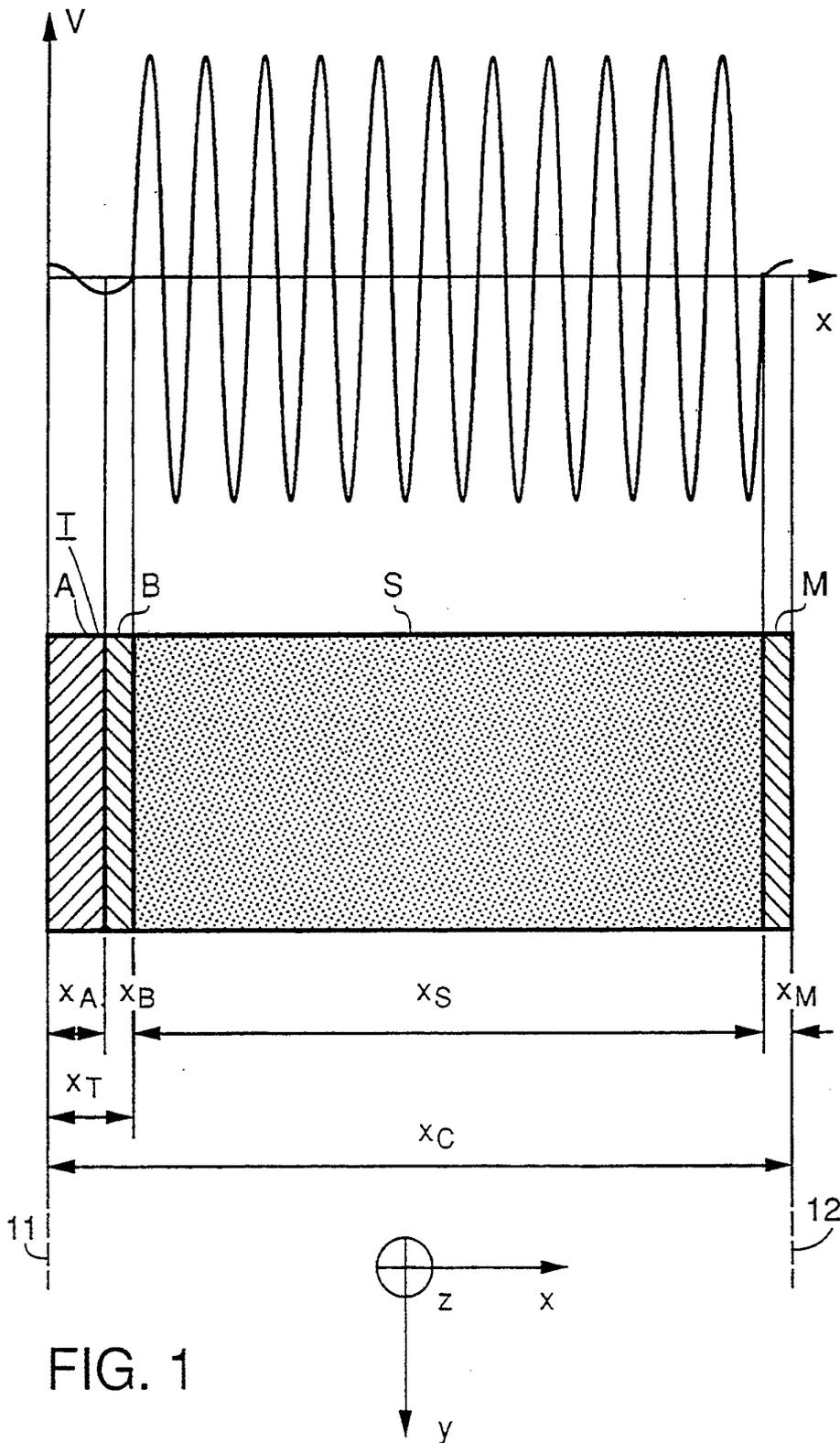


FIG. 1

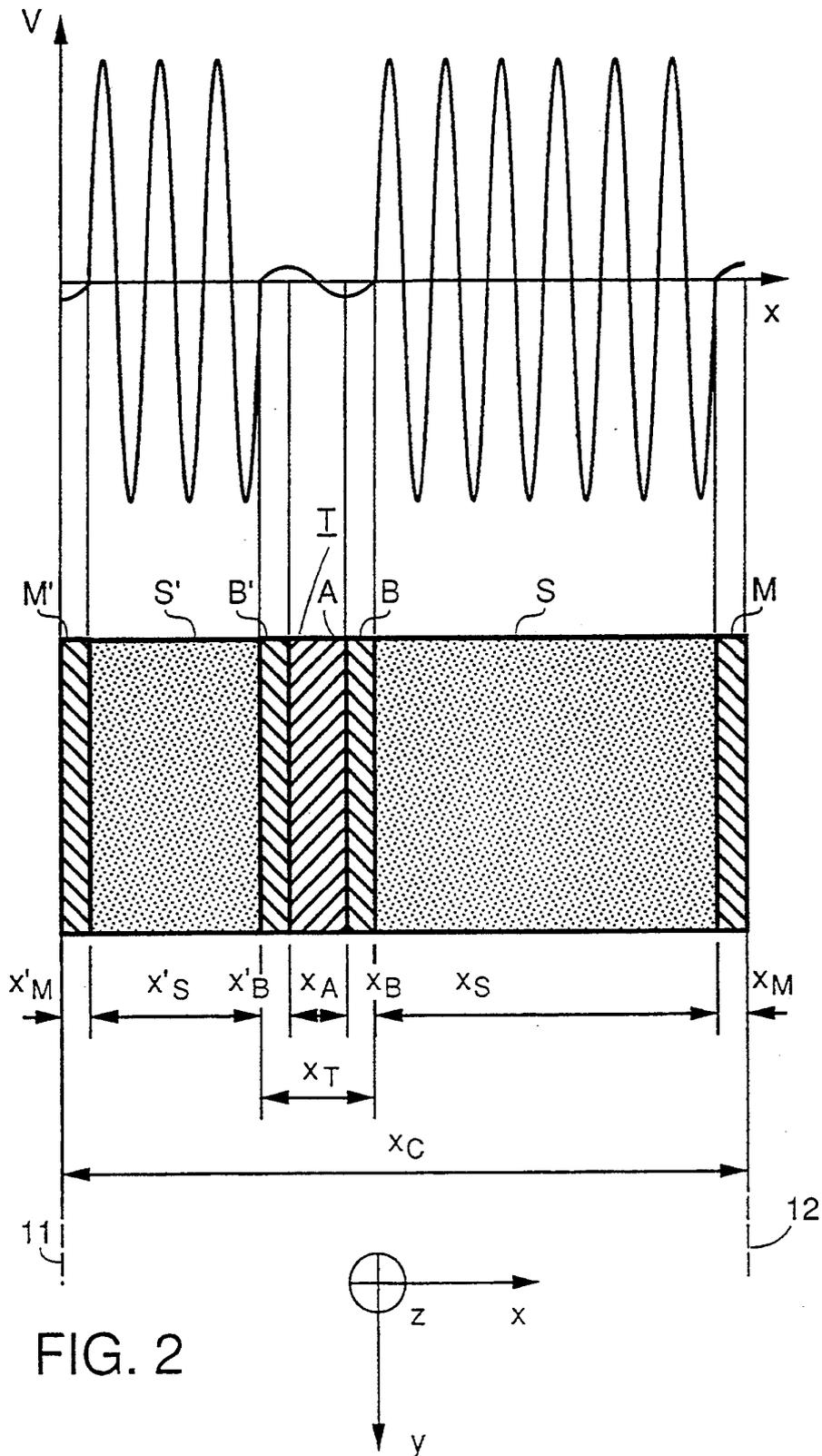


FIG. 2

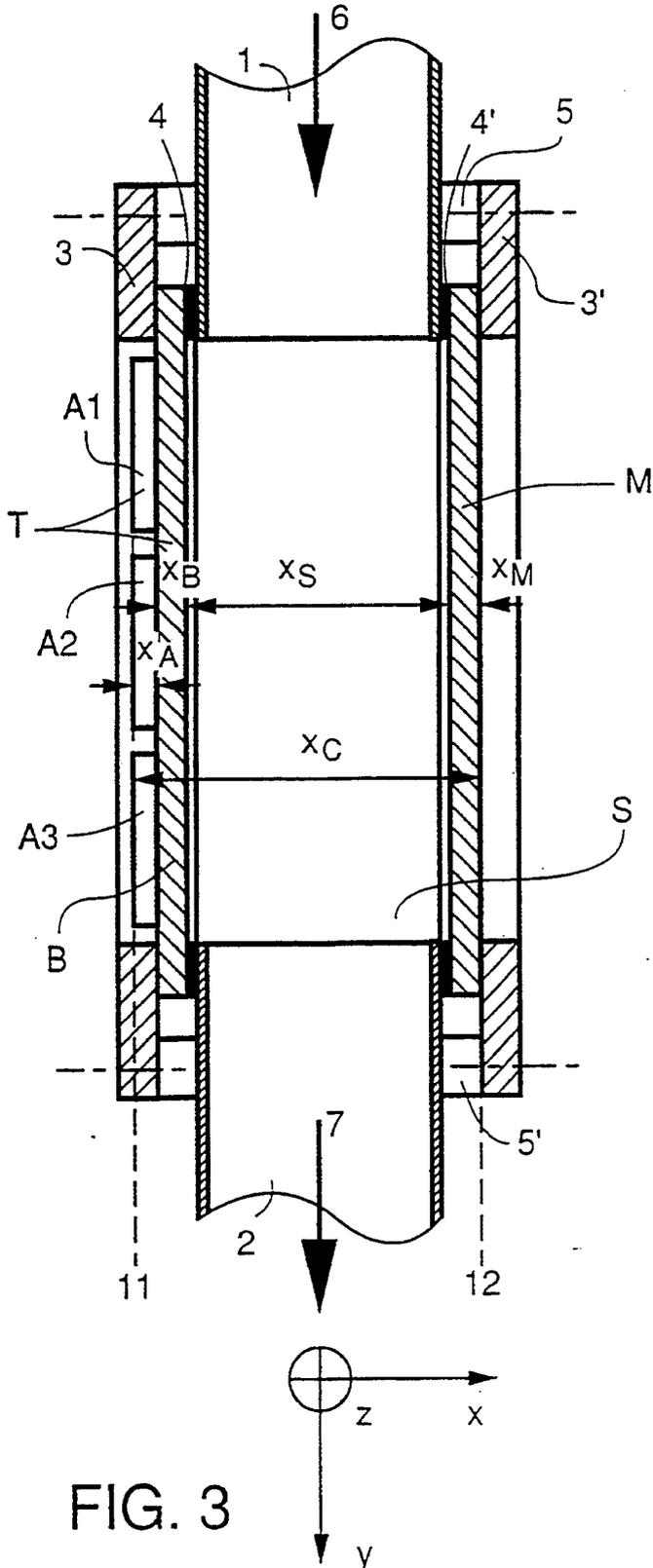


FIG. 3

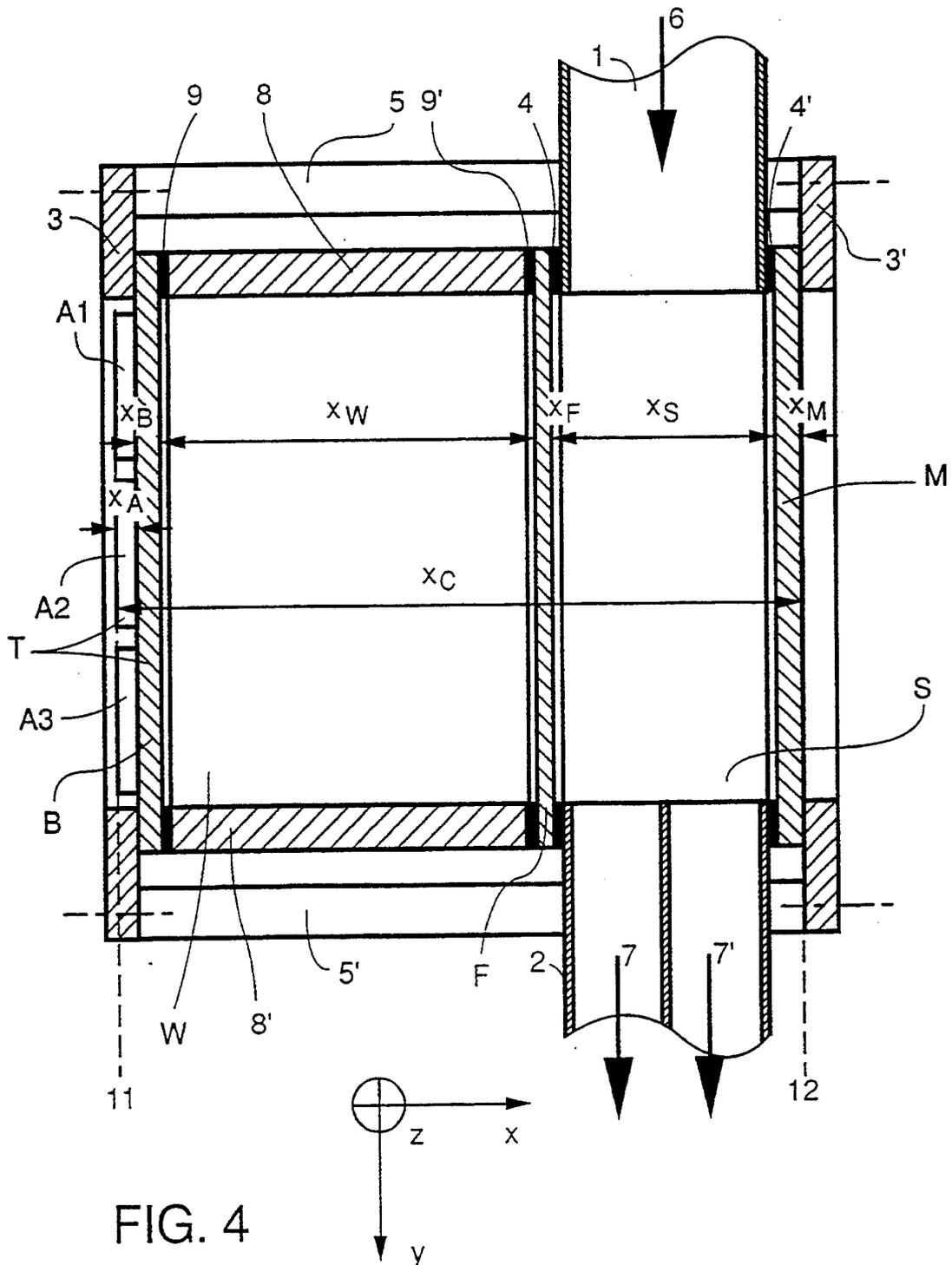


FIG. 4

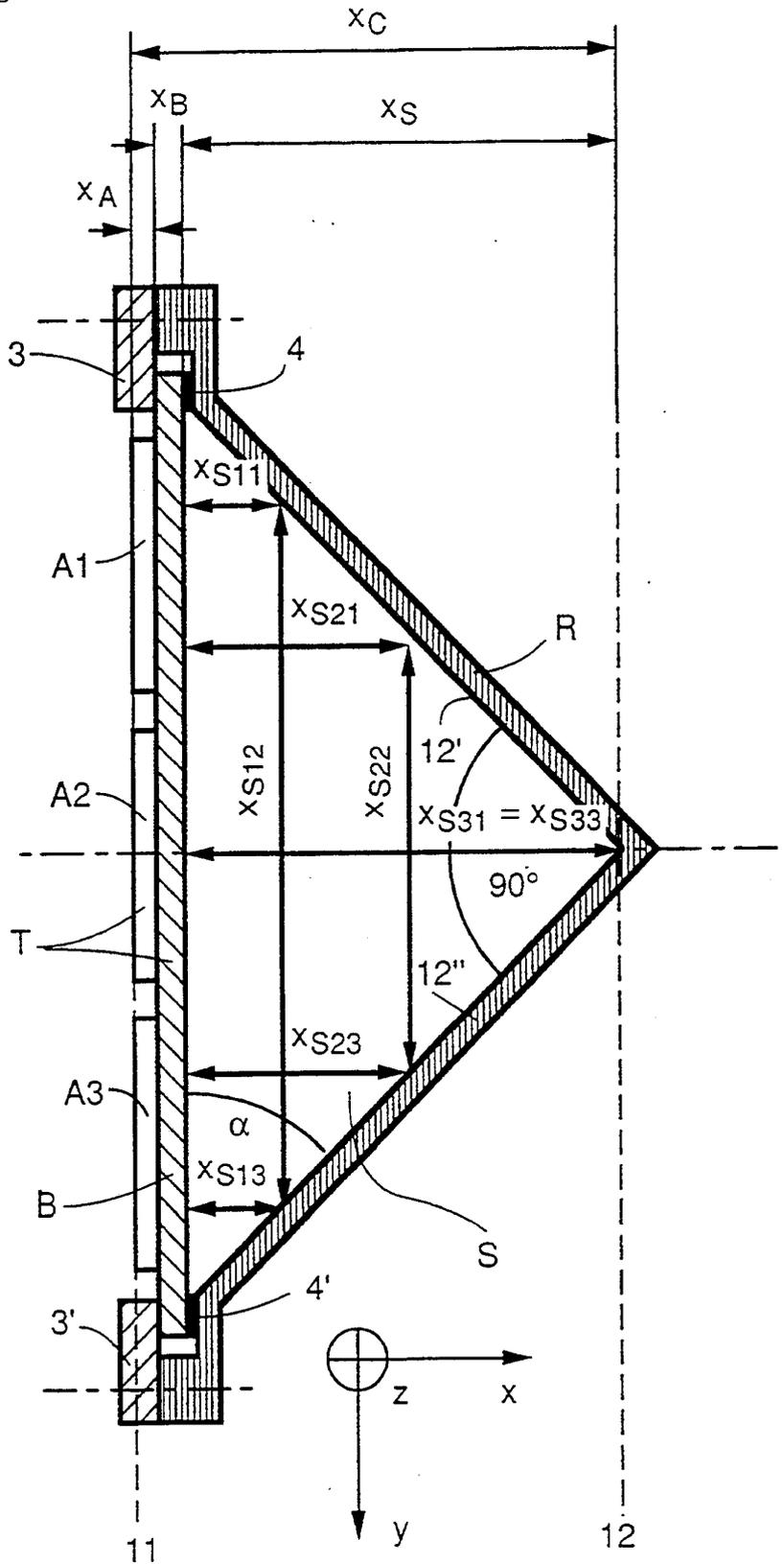
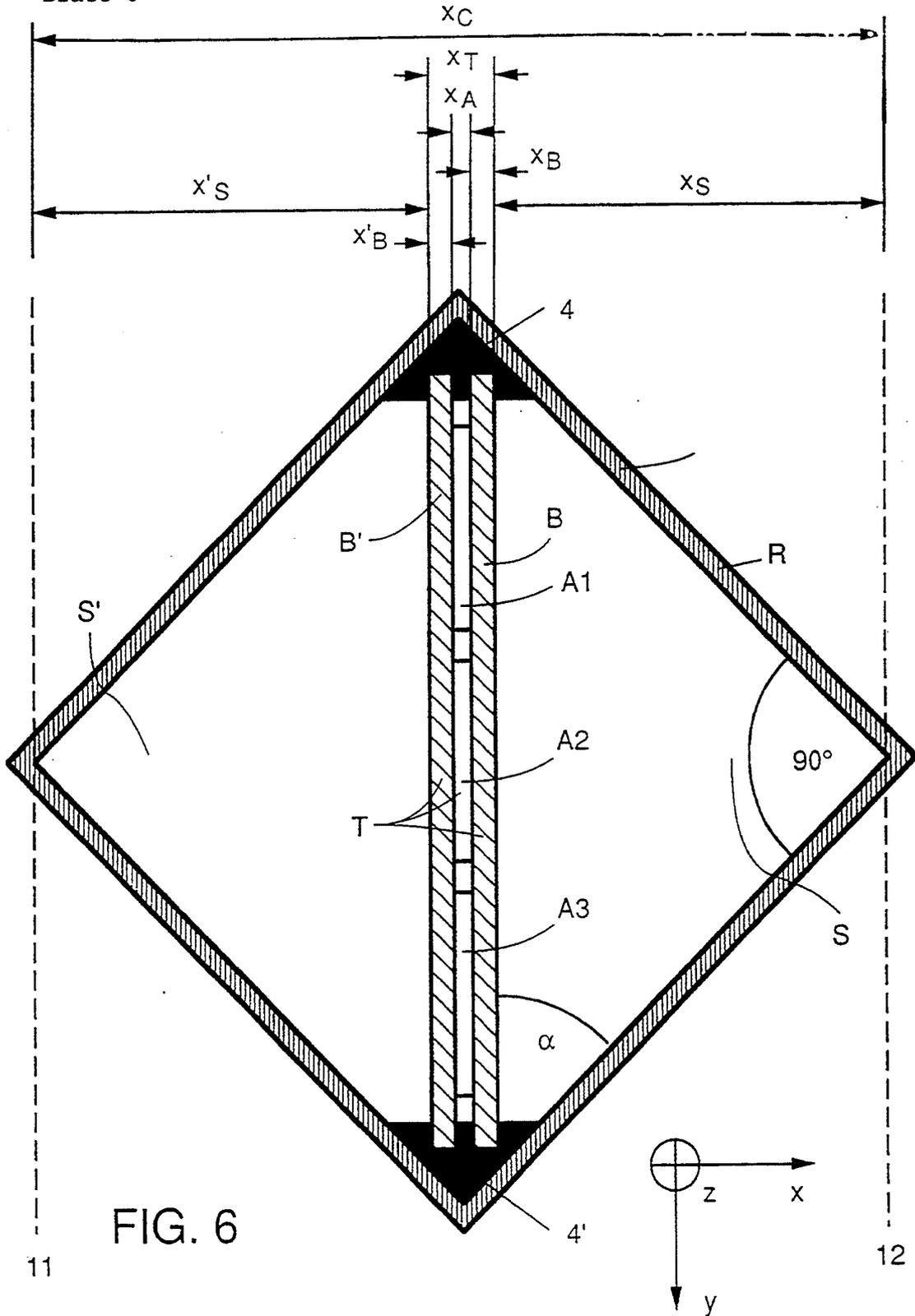


FIG. 5



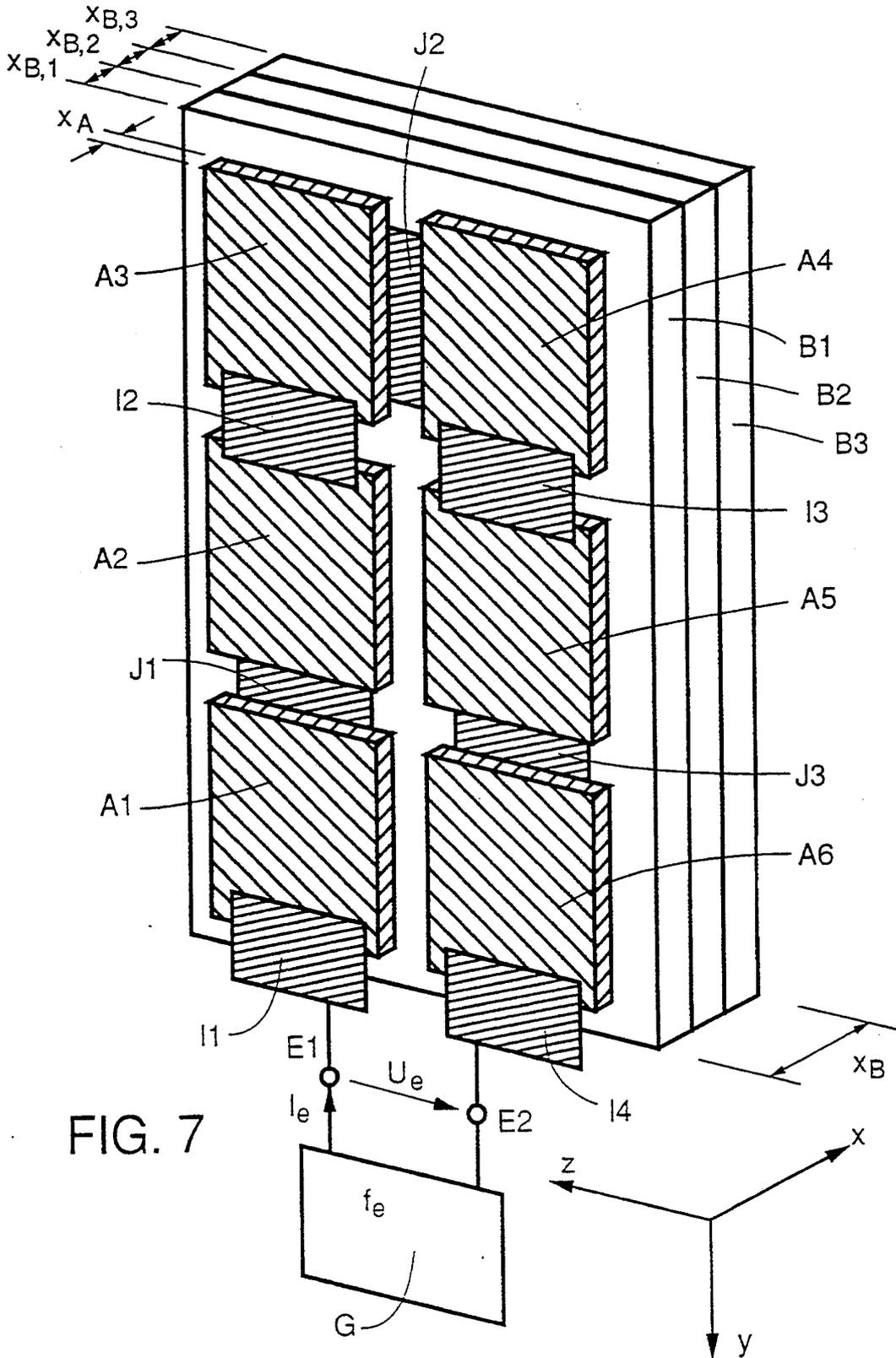


FIG. 7