

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 954 847 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

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

18.07.2001 Patentblatt 2001/29

(21) Anmeldenummer: **98907846.4**

(22) Anmeldetag: **21.01.1998**

(51) Int Cl.7: **G10K 15/06**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE98/00184

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 98/33171 (30.07.1998 Gazette 1998/30)

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERZEUGUNG VON STOSSWELLEN FÜR TECHNISCHE, VORZUGSWEISE MEDIZINTECHNISCHE ANWENDUNGEN**

METHOD AND DEVICE FOR PRODUCING SHOCK WAVES FOR TECHNICAL AND SPECIALLY MEDICO-TECHNICAL APPLICATIONS

PROCEDE ET DISPOSITIF DE PRODUCTION D'ONDES DE CHOC POUR APPLICATIONS TECHNIQUES, DE PREFERENCE MEDICO-TECHNIQUES

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB

(30) Priorität: **24.01.1997 DE 19702593**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
10.11.1999 Patentblatt 1999/45

(73) Patentinhaber: **SIEMENS
AKTIENGESELLSCHAFT
80333 München (DE)**

(72) Erfinder:
• **HARTMANN, Werner
D-91091 Groenseebach (DE)**
• **KIESER, Jörg
D-91301 Forchheim (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:

DE-A- 1 814 561	DE-B- 1 076 413
DE-C- 911 222	GB-A- 2 140 693
US-A- 4 703 463	US-A- 5 105 801
US-A- 5 245 988	

- **BOURLION M ET AL: "DESIGN AND CHARACTERIZATION OF A SHOCK WAVE GENERATOR USING CANALIZED ELECTRICAL DISCHARGE: APPLICATION TO LITHOTRIPSY" REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Bd. 65, Nr. 7, 1.Juli 1994, Seiten 2356-2363, XP000458557 in der Anmeldung erwähnt**
- **RINK K ET AL: "Incidence of cavitation in the fragmentation process of extracorporeal shock wave lithotriptors" APPLIED PHYSICS LETTERS, 9 MAY 1994, USA, Bd. 64, Nr. 19, ISSN 0003-6951, Seiten 2596-2598, XP002071136 in der Anmeldung erwähnt**

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

EP 0 954 847 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung besieht sich auf eine Vorrichtung zur Erzeugung von Stoßwellen für technische, vorzugsweise medizintechnische Anwendungen, insbesondere für die Lithotripsie oder die Schmerztherapie, wobei durch Druckpul-

sationen mechanische Wellen hoher Energie erzeugt werden.
[0002] Für verschiedene Anwendungen werden intensive Schallwellen oder Stoßwellen eingesetzt, deren Arbeitsdrücke im Bereich einiger 10^7 Pa bis zu 10^8 Pa liegen. Ein Beispiel ist die Lithotripsie in der Medizintechnik, bei der durch extra-korporal erzeugte, fokussierte Druckwellen am Ort von Gallen- oder Nierensteinen eine so starke Stoßwelle erzeugt wird, daß der Stein in kleine Fragmente zerfällt, welche ohne operative Maßnahmen auf natürliche Weise den Körper verlassen können. Für eine ausreichend hohe Fragmentation des Steins sind dazu typischerweise einige 100 bis einige 1000 Stoßwellenanwendungen, d.h. Einzelpulse, erforderlich.

[0003] Zur Erzeugung letzterer Stoßwellen benötigt man einen Stoßwellengenerator, der eine bereits fokussierte oder durch insbesondere akustische -Linsen fokussierbare Schallwelle erzeugt, deren Fokus am Ort des zu zerstörenden Steins liegen muß. Die Brennweite der akustischen Anordnung sollte dabei klein, d. h. im Bereich einiger 10 cm sein, um die Energiedichte an der Körperoberfläche des Patienten soweit, d.h. auf $< 1 \text{ J/cm}^2$ zu begrenzen, daß der beim Schalldurchtritt entstehende Schmerz durch Lokalanästhetika beherrschbar ist.

[0004] Für eine vertretbare Behandlungsdauer sollte die Pulswiederholrate bei etwa 1 bis 5 pro Sekunde liegen. Die Lebensdauer des Stoßwellengenerators muß möglichst hoch, d.h. bei einigen Millionen Pulsen, liegen, um die Behandlung einer größeren Anzahl an Patienten ohne notwendige Service- bzw. Reparaturarbeiten zu ermöglichen. Während der gesamten Lebensdauer dürfen sich die Eigenschaften des Stoßwellengenerators, insbesondere Stoßwellenenergie, Impulsdauer, Fokusslage, etc., nicht oder nur geringfügig ändern, um konstante, reproduzierbare Arbeitsergebnisse zu ermöglichen. Die Erzeugung der Stoßwellen sollte in Wasser oder in Flüssigkeiten mit akustisch dem Wasser vergleichbaren Eigenschaften erfolgen, damit eine effiziente Schallausbreitung und -übertragung in den Körper des Patienten über eine angepaßte akustische Impedanz zwischen Stoßwellengenerator und Körper möglich wird. Der Fokusedurchmesser der fokussierten Stoßwelle am Ort des Steins ($\sim \text{cm}$) sollte vergleichbar sein mit den Abmessungen des Steins, um eine effiziente Wechselwirkung zwischen Stoßwelle und Stein zu erreichen. Typische Wellenlängen der Stoßwelle liegen im Bereich von 1 bis 10 mm, entsprechend Pulsdauern von typischerweise $\sim 1 \mu\text{s}$. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Qualität der Wellenfront im Stoßwellengenerator, um die geforderte Fokussierbarkeit zu erzielen.

[0005] Ähnliche Anforderungen werden auch bei anderen technischen Anwendungen erhoben, so z.B. beim Recycling durch Stoßwellen, beim Reinigen von Oberflächen durch Stoßwellen, im Bergbau, beispielsweise Felszerkleinerung ohne Einsatz chemischer Sprengmittel, in der Geologie und der Meereskunde, beispielsweise für Sonaranwendungen. Dabei werden zum Teil wesentlich höhere und u.U. auch variablere Pulsenergien gefordert als bei der Lithotripsie, so daß für viele Anwendungen ein nahezu beliebig skalierbares Stoßwellengeneratorprinzip von großem Nutzen wäre.

[0006] Zur Erzeugung von Stoßwellen werden, abgesehen vom Einsatz chemischer Explosivstoffe, bisher ausschließlich die folgenden drei Prinzipien eingesetzt, bei denen elektrische Energie in akustische Energie in Form intensiver Stoßwellen umgesetzt wird:

- Das elektrohydraulische Prinzip mit Erzeugung einer sphärisch expandierenden Druckwelle durch einen Unterwasserfunken, und gegebenenfalls Fokussierung mit ellipsoidischen Reflektoren, wozu Ausführungen in Rev.Sc. Instrument 65 (1994), S. 2356 - 2363 und Biomed. Tech. 22 (1977), S. 164 ff. gemacht werden.
- Das piezoelektrische Prinzip mit Erzeugung einer Druckwelle durch Einsatz gepulst betriebener piezoelektrischer Schallwandler, beispielsweise gemäß der DE 33 19 871 A1.
- Das elektromagnetische Prinzip mit Erzeugung einer Druckwelle durch eine elektromagnetisch angetriebene Membran, was im einzelnen in Appl. Phys. Lett. 64 (1994), S 2596-2598 und Acustica 14 (1964), S. 187 beschrieben ist.

[0007] Insbesondere beim erstgenannten Prinzip sind Hauptnachteile die kurze Lebensdauer, schlechte Reproduzierbarkeit und begrenzte Skalierbarkeit der Stoßwellenwandler, wobei vor allem die kurze Lebensdauer, z.B. nur einige 1000 Pulse, aufgrund des Elektrodenabbrandes sowie die damit verbundene Schwankung der Fokusslage Probleme bereiten. Piezoelektrische Wandler sind bei den hier geforderten Amplituden in ihrer mechanischen Lebensdauer ebenfalls stark eingeschränkt. Elektromagnetische Schallwandler erreichen z.Z. die größten Lebensdauern von typisch ~ 1 Million Pulse, sind jedoch aus Gründen elektrischer und mechanischer Belastbarkeit nur begrenzt skalierbar. Eine Verlängerung der Lebensdauer auf mehrere Millionen Pulse wäre vorteilhaft, wie auch eine breitere Skalierbarkeit der Schallwellenenergie und Impulsform.

[0008] Zur Realisierung des elektrohydraulischen Prinzips ist aus der DE 0 911 222 C ein Schallsender bekannt, bei dem der Schalldruck bei Stromdurchgang in eng begrenzten Flüssigkeitsfäden bewirkten stoßartigen Verdampfungen erzeugt wird. Aus der DE 10 76 413 B ist bereits ein Schallerzeugungsverfahren bekannt, bei dem die Feldlinienkon-

traktion an einem Draht bzw. am Ende eines Drahtes oder an der Einengungsstelle durch einen elastischen Isolierkörper dazu benützt wird, eine hohe Felddichte und damit eine hohe Leistungsdichte in der nahen Umgebung des Drahtes zu erreichen. Dadurch können jedoch nur kleine Volumina in der unmittelbaren Nähe des Drahtes bzw. in der Einengungsstelle ausgenutzt werden, so daß zum einen ein Großteil der Energie bei geringer Energiedichte in großen Volumina umgesetzt wird, wodurch Energieinhalt der Druckwelle und Wirkungsgrad drastisch abnehmen, zum anderen die erreichbare Energie aufgrund des geringen Volumens sehr gering ist. Die Parallelschaltung einer Vielzahl solcher Kanäle hat in der Praxis zur Folge, daß aufgrund geringer Unterschiede der Kanäle untereinander ein einzelner Kanal bevorzugt wird, der dann stärker aufgeheizt wird als die übrigen; der aus der stärkeren Aufheizung resultierende frühere und stärkere Stromfluß führt im allgemeinen zu einem stromstarken Durchschlag, so daß sich wegen der Nichtlinearität der zum Durchschlag führenden Prozesse das Prinzip nur bei sicheren, weit von der Durchschlagfestigkeit des Elektrolyten entfernten Leistungsdichten betreiben läßt. Dadurch werden sowohl die Amplitude als auch der Wirkungsgrad einer solchen Impulsschallquelle stark begrenzt. Auch geringe Unterschiede der Kanäle führen zu merklichen Schwankungen der zugehörigen Druckamplituden, so daß mit einem solchen System homogene Wellenfronten nur bedingt herstellbar sind.

[0009] Schließlich ist aus der US 5 105 801 A eine Anordnung bekannt, bei der innerhalb eines in einem Parabolreflektor angeordneten Elektrolytvolumens zwei Entladungselektroden auf einen internen Fokus gerichtet sind und so Schallwellen erzeugt werden die auf Punkte außerhalb des Reflektors fokussierbar sind.

[0010] Aufgabe der Erfindung ist es demgegenüber, eine nach einem thermohydraulischen Verfahren arbeitende Vorrichtung zur Erzeugung von Stoßwellen anzugeben, mit der ohne Verschleißprobleme mehrere Millionen Pulse erzeugt werden können.

[0011] Die Aufgabe ist erfindungsgemäß durch die Gesamtheit der Merkmale des Patentanspruches 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

[0012] Die Erfindung geht davon aus, daß über eine kurzzeitige Aufheizung eines gut leitfähigen Elektrolyten mit Hilfe eines intensiven elektrischen Impulses die eingekoppelte elektrische Energie direkt und weitestgehend verlustfrei in thermische Energie des Elektrolyten umgesetzt wird. Die Aufheizung kann größere, skalierbare Volumina bzw. große, ebenfalls skalierbare Oberflächen simultan und homogen erfassen. Bei der Aufheizung einer großflächigen Flüssigkeitsschicht über direkten Stromfluß bleiben Stromdichte und elektrische Feldstärke innerhalb der Flüssigkeitsschicht weitestgehend konstant, wobei die Dicke der Flüssigkeitsschicht kleiner als die zu erzeugende Wellenlänge, die Querschnittsabmessung im Vergleich dazu jedoch groß ist. Über die Wärmeausdehnung des erwärmten Elektrolyten wird in geeignetem Umgebungsmedium ein Druckanstieg und damit, unter geeigneten Randbedingungen, eine Druckwelle erzeugt, die sich in diesem Medium ausbreiten kann.

[0013] Aufgrund des erfindungsgemäßen Prinzips ist eine nahezu beliebige Skalierbarkeit und Geometrie bei gleichzeitig nahezu verschleißfreiem Verhalten eines solchen thermohydraulischen Stoßwellenwandlers möglich. Da im Gegensatz zu dem elektrohydraulischen Prinzip generell keine Konzentration des Stromflusses durch Plasmabildung an einzelnen Punkten der Elektroden erfolgt, führt der Betrieb einer solchen Anordnung nicht zum Abbrand der Elektroden, wodurch eine hohe Lebensdauer erreichbar ist. Durch die räumlich homogene Leistungsbelastung des Elektrolyten wird auch die Membran bzw. akustisch "durchlässige" Elektrode mechanisch sehr homogen belastet, wodurch die Lebensdauer der Membran ebenfalls stark erhöht wird im Vergleich zu elektromagnetischen Schallwandlern.

[0014] Anordnungen gemäß der vorliegenden Erfindung haben insgesamt den Vorteil, daß durch die gezielte Vermeidung von feldverstärkenden Strukturen - Drähte, Spitzen, Kanten oder auch Einengungen des stromführenden Bereiches - großflächig und homogen große Volumina bis an die Grenze der Durchschlagfestigkeit gleichmäßig belastet werden können, so daß keine Beschränkung hinsichtlich Impulsenergie und Skalierbarkeit entstehen. Der Vorteil der neuen Anordnung liegt vor allem darin, daß die entstehenden Wellenfronten sehr gleichmäßig sind, so daß man eine nahezu unbegrenzt skalierbare Impulsschallquelle mit hoher Qualität der Wellenfront erhält.

[0015] Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Figurenbeschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung, die die Arbeitsweise von erfindungsgemäßen thermohydraulischen Schallwandlern wiedergeben. Es zeigen jeweils in schematischer Darstellung

FIG 1 einen thermohydraulischen Stoßwellengenerator mit ebenen Elektroden und zugehörigem Leistungsimpuls-generator,

FIG 2 einen rotationssymmetrischen thermohydraulischen Stoßwellengenerator und zugehörigem Leistungsimpuls-generator mit einer radialen Elektrodenanordnung und radialem Stromfluß,

FIG 3 einen thermohydraulischen Stoßwellengenerator mit konkaven Elektroden, sowie

FIG 4 und 5 eine Draufsicht und einen Schnitt einer spezifischen Ausbildung einer fokussierenden Elektrode.

[0016] FIG 1 zeigt das Prinzip eines thermohydraulischen Schallwandlers mit ebenen Elektroden. Bei einer solchen Ausführungsform wird, entsprechend der Geometrie der Anordnung, eine ebene Schallwelle erzeugt, die von einer gegebenenfalls nachfolgenden akustischen Linse fokussiert werden kann. Der Schallwandler besteht aus einer fest-

stehenden, massiven Elektrode 1, einer dünnen und leichten Elektrode 2 im Abstand s von der Elektrode 1, dem Elektrolyten 3 der Schichtdicke s , und dem Schallausbreitungsmedium 4.

[0017] Die feststehende Elektrode 1 und die membranförmige Elektrode 2 sind beide aus gegenüber den Medien 3 und 4 korrosionsbeständigen Materialien gefertigt und weisen glatte Oberflächen auf, um die Ausbildung lokalisierter Entladungen aufgrund von Feldstärkeüberhöhungen an Spitzen etc. zu vermeiden.

[0018] Das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit der Elektrode 1 ist deutlich größer als die Produkte dieser Größen im Elektrolyten 3 und dem Schallausbreitungsmedium 4. Die akustische Impedanz des Elektrolyten 3 und des Schallausbreitungsmediums 4 sollen möglichst gleich sein und etwa der von Wasser, d.h. dem Hauptbestandteil des menschlichen Körpers, entsprechen, um eine gute akustische Anpassung zwischen dem Schallwandler und dem Patientenkörper zu erzielen. Zweckmäßigerweise wird als Schallausbreitungsmedium 4 gasfreies, vollentsalztes Wasser und als Elektrolyt 3 eine leitfähige Salzlösung verwendet.

[0019] Eine besonders einfache Ausführungsform verwendet für das Schallausbreitungsmedium 4 dasselbe Material wie für den Elektrolyten 3. Es sind dazu auch andere Flüssigkeiten als Wasser, aber mit vergleichbaren elektrischen und akustischen Eigenschaften, verwendbar. Insbesondere bei anderen Anwendungen als in Lithotriptern ist es sinnvoll, die akustische Impedanz der Medien 3 und 4 an die des Koppelmediums anzupassen. Dies ist insbesondere bei anderen Anwendungen als der Medizintechnik von Bedeutung, wie beispielsweise bei der Felszerkleinerung mittels Stoßwellen.

[0020] Die Stromzuführung zur Elektrode 2 muß symmetrisch aufgebaut sein, um die gewünschte Symmetrie der zu erzeugenden Druckwelle über eine symmetrische Strom- und Leistungsverteilung im Elektrolyten 3 zu erreichen. Vorteilhaft ist dazu die Beibehaltung einer coaxialen Stromzuführung bis zu den Elektroden 1 und 2.

[0021] An die Elektroden 1 und 2 angeschlossen ist ein Leistungsimpulsgenerator 5, der elektrische Energie in Form kurzer Pulse mit Zeitdauern von typisch μs bereitstellt. Im einfachsten Fall besteht der Impulsgenerator aus einem Energiespeicher in Form eines Hochspannungskondensators C, einem schnell schließenden Schaltelement S, und einer aus den Zuleitungen gebildeten Induktivität L. Beim Schließen des Schalters S entlädt sich der Kondensator C über die Induktivität L und den Schalter S in den Elektrolyten mit dem Innenwiderstand R. Der Energieinhalt E des Speichers ist

$$E = C \cdot U^2 / 2$$

mit der Ladespannung U des Kondensators. Dadurch wird der Elektrolyt um die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = E / (\rho_m \cdot C_h \cdot A \cdot s)$$

erwärmt, wobei ρ_m die Massendichte des Elektrolyten ($\sim 1,0 \text{ g/cm}^3$ für wäßrige Lösungen), C_h die Wärmekapazität des Elektrolyten, und $A \cdot s$ das Volumen des Elektrolyten (= Fläche A * Dicke s) ist. Bei ausreichend kurzen Impulsen im μs -Bereich kann die Wärmeleitung vernachlässigt werden. Dadurch dehnt sich der Elektrolyt um

$$\Delta V / V = \alpha \cdot \Delta T$$

aus, wobei α der Volumenausdehnungskoeffizient ist. Für den Fall, daß

$$r \gg s$$

gilt und $s < \lambda$, $r > \lambda$

ist mit $2 \cdot r$ = Durchmesser der Elektroden 1 und 2, λ = Länge der Stoßwelle, $\lambda = c_s \cdot \tau$ mit c_s = Schallgeschwindigkeit in den Medien 3 und 4 und τ = Pulsdauer, dehnt sich der Elektrolyt fast ausschließlich in der Richtung senkrecht zur Elektrodenoberfläche aus. Für die relative Schichtdickenänderung erhält man

$$\Delta s / s \sim \Delta V / V = \alpha \cdot \Delta T$$

Diese Änderung von s wird wegen der endlichen Schallgeschwindigkeit c_s über einen Weg

$$\lambda' = s + \lambda$$

aufgrund der endlichen Kompressibilität K der Medien 3 und 4 abgebaut. Wenn κ und c_s für beide Medien 3 und 4 als

identisch angenommen werden, erhält man für den mittleren Druckanstieg innerhalb des Bereichs λ :

$$\Delta p = \alpha \cdot E / [(s + \lambda) \cdot \kappa \cdot \rho_m \cdot C_h \cdot A]$$

und für den Fall $s \ll \lambda$, d. h. im Fall vernachlässigbarer Schichtdicke s im Vergleich zur Stoßwellenbreite λ :

$$\Delta p = \alpha \cdot E / [c_s \cdot \tau \cdot \kappa \cdot \rho_m \cdot C_h \cdot A]$$

Letzteres bedeutet, daß die Amplitude des Druckanstiegs unabhängig von der Schichtdicke s ist.

[0022] Für α , c_s , K , ρ , und C_h lassen sich, bei Verwendung einer wässrigen Lösung oder Ethanol für die Medien 3 und 4, die Werte aus der Literatur entnehmen. Folgende Werte ergeben sich:

Symbol	Parameter	Wasser	Ethanol	Einheit
α	Volumenausdehnungskoeffizient	$2,07 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$	1/K
c_s	Schallgeschwindigkeit	1480	1170	m/s
κ	Kompressibilität	$0,5 \cdot 10^{-9}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$	1/Pa
ρ_m	Massendichte	10^3	789	kg/m ³
C_h	Wärmekapazität	$4,18 \cdot 10^3$	$2,43 \cdot 10^3$	J/kg

[0023] Bei einer Pulsenergie von 200 J, einer Elektrodenoberfläche $A = 100 \text{ cm}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$ und einer Pulsdauer von $\tau \sim 5 \mu\text{s}$ erzielt man somit eine *ebene Druckwelle* mit einer mittleren Amplitude von

$$\Delta p \sim 2,66 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \sim 2,6 \text{ bar}$$

in wässrigen Elektrolyten, bzw.

$$\Delta p \sim 1,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \sim 16 \text{ bar}$$

in einem Elektrolyten, der als Hauptbestandteil Ethanol enthält.

[0024] Dieser Druckanstieg breitet sich im Medium 4 als ebene Welle senkrecht zur Oberfläche der Elektrode 1 aus und kann von einer akustischen Linse fokussiert werden; dabei werden Fokusdurchmesser $2 \cdot r_f$ von typisch

$$2 \cdot r_f \sim \lambda$$

erreicht, d.h. die ebene Welle wird um ein bis zwei Größenordnungen komprimiert, was zu einer entsprechenden Druckerhöhung im Fokus führt.

[0025] Über eine Vergrößerung von A lassen sich die im Fokus erzielbaren Spitzendrucke in weiten Grenzen skalieren. Mit Hilfe der beschriebenen Anordnung ist es somit möglich, reproduzierbar und praktisch verschleißfrei Stoßwellen mit Amplituden im $> 100 \text{ bar}$ -Bereich zu erzeugen, welche für die Anwendung in Lithotriptern geeignet sind.

[0026] Eine Erhöhung des Drucks erhält man durch eine Verkürzung der Pulsdauer, da wegen der endlichen Schallgeschwindigkeit die im Elektrolyten deponierte Energie auf ein kleineres Volumen verteilt und der Druckanstieg dementsprechend über eine kürzere Strecke abgebaut wird. Bei gleicher Pulsenergie von 200 J und einer Pulsdauer von nur $\tau = 1 \mu\text{s}$ steigt der Anfangsdruck bereits auf $\Delta p \sim 10 \text{ bar}$ bei Verwendung eines wässrigen Elektrolyten.

[0027] Durch die Verwendung spezifischer Elektrolyte als Medium 3 läßt sich eine zusätzliche Erhöhung des Drucks erreichen: Insbesondere sind Flüssigkeiten mit niedriger Wärmekapazität und kleiner Kompressibilität bei gleichzeitig großem Wärmeausdehnungskoeffizienten vorteilhaft. Ein Beispiel ist Ethanol, dem ionenleitende Zusätze beigemischt werden. Als Zusatz ist beispielsweise eine Beimischung aus Wasser mit einem darin gelösten Salz geeignet, um die geforderte Leitfähigkeit zu erreichen. Für das oben angegebene Beispiel ($E = 200 \text{ J}$; $\tau = 1 \mu\text{s}$) erhält man Drücke der Größenordnung $\Delta p \sim 40 \text{ bar}$ bei Verwendung von Ethanol. Besonders vorteilhaft ist die Verwendung höherwertiger, bei Raumtemperatur nicht entflammbarer Alkohole, wie beispielsweise Ethylenglycol oder Glycerin mit darin löslichen Salzen, z.B. Magnesiumperchlorat oder Lithiumchlorid.

[0028] Gemäß FIG 2 verwendet eine vorteilhafte Ausführung eine Elektrodenanordnung mit Stromfluß in radialer anstatt axialer Richtung und läßt somit höhere Betriebsspannungen am Elektrolyten 3 zu. Der Leistungsimpuls wird an eine in der Symmetrieachse zentrische Elektrode 8 und eine dazu coaxial angeordnete, zylindrische oder ringförmige Elektrode 7 angelegt. Der Strom fließt bei dieser Ausführungsform, bei der Rotationssymmetrie vorausgesetzt wird, in radialer Richtung zwischen den Elektroden 7 und 8 im Elektrolyten 3. Dies bedeutet, daß der Stromfluß - im Gegensatz zu Figur 1 mit einem Stromfluß in der Flüssigkeitsschicht in Richtung der bevorzugten Schallausbreitung - in diesem Fall senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung erfolgt. Der Elektrolyt 3 mit der Schichtdicke s ist auf der einen Seite durch eine isolierende Platte 9 und auf der anderen Seite durch eine ebenfalls isolierende Membran 10 gegen das Ausbreitungsmedium 4 abgegrenzt, um den Stromfluß dadurch auf das Volumen mit der Elektrolytdicke s zu begrenzen. Die Elektrodenschlagweite s' wird dadurch von s auf annähernd den Radius der Anordnung erweitert, wodurch wesentlich höhere Spannungen an den Elektroden zulässig werden, ohne daß die Gefahr eines Durchschlags im Elektrolyten entsteht. Dadurch kann im Elektrolyten 3 eine wesentlich höhere Energiedichte erzeugt werden, die zu erheblich höheren Druckamplituden führt als im Fall axialen Stromflusses.

[0029] Eine Fokussierung der Druckwelle wird in vorteilhafter Weise dadurch erreicht, daß zwei Elektroden 21 und 22 nicht eben, sondern entsprechend FIG 3 konkav ausgebildet sind. Es wird so eine gekrümmte Wellenfront erzeugt, die zu einer konzentrisch einlaufenden Druckwelle führt, welche einen ausgeprägten Fokus im Brennpunkt des von der Elektrodenoberfläche der Elektrode 21 gebildeten Reflektors aufweist. In dieser selbstfokussierenden Anordnung kann auf eine akustische Linse verzichtet werden, so daß die mit der Linse verbundenen Abbildungsfehler und Verluste entfallen.

[0030] Eine Ausbildung der Elektroden 21 und 22 in konvexer Form würde zur Ausbildung von sphärisch expandierenden Stoßwellen führen, die z.B. für Ultraschall-Tomographie in der Medizintechnik sowie in der allgemeinen Technik für Sonar-Systeme im Wasser und in der Erdkruste, dem sogenannten "Geo-Mapping", eingesetzt werden können.

[0031] In weiteren vorteilhaften, nicht im einzelnen gezeigten Ausführungsformen kann die Geometrie der Elektroden 1 und 2 eine andere als ebene oder sphärische Geometrie aufweisen. Bei Verwendung zylindrischer Elektrodenformen läßt sich beispielsweise ein Linienfokus erzeugen, der vorteilhaft zum präzisen Trennen spröder Objekte, wie beispielsweise Halbleiterscheiben, Glaswerkstücke, Keramiksubstrate, optische Bauteile, Keramikfliesen, etc., oder zum Reinigen größerer Gußteile einsetzen läßt. Durch Anpassung von Geometrie und elektrischen Parametern läßt sich ein thermohydraulischer Stoßwellengenerator für nahezu jede Anwendung optimieren, bei der hohe mechanische Kräfte nur kurzzeitig, d.h. stoßartig, benötigt werden.

[0032] Zwischen den beiden Elektroden 1 und 2 kann eine regelmäßige oder auch unregelmäßige Gitterstruktur angeordnet sein, die dazu dient, den Abstand zwischen den beiden Elektroden zu definieren, um so zu verhindern, daß der zur Vermeidung von Überschlagen notwendige Mindestabstand nicht unterschritten wird. Zweckmäßigerweise verwendet man für den Werkstoff des Gitters einen isolierenden Kunststoff mit einer Dielektrizitätszahl ähnlich der des verwendeten Elektrolyten 3 zwischen den Elektroden 1 und 2. Dadurch wird vermieden, daß es zu lokalen Feldüberhöhungen an den Tripelpunkten des Überganges Elektrode - Gitter - Medium 3 kommt, die ansonsten zu unerwünschten Überschlagen führen könnten.

[0033] Für die Dimensionierung des Stoßwellengenerators ist die Kopplung mit dem Impulsgenerator ausschlaggebend. Bei einer für die Leistungsimpulstechnik typischen Impedanz Z von $Z = \sqrt{L/C} \sim 1 \Omega$ benötigt man einen Innenwiderstand des Elektrolyten von $R \sim 1 \Omega$. Der Innenwiderstand R des Elektrolyten berechnet sich zu $R = \rho \cdot s/A$ und daraus der spezifische Widerstand ρ zu $\rho = A \cdot R/s = 103 \Omega \cdot \text{cm}$.

[0034] Ein entsprechender spezifischer Widerstand wird beispielsweise durch wäßrige Salzlösungen mit Konzentrationen im Bereich $C \sim 1 \text{ g/l}$ erreicht, wenn die Oberfläche A im Bereich $A \sim 100 \text{ cm}^2$ und der Elektrodenabstand s mit $s \cong 1 \text{ mm}$ dimensioniert werden.

[0035] Bei einem Elektrodenabstand von $s = 1 \text{ mm}$ erreicht man eine Spannungsfestigkeit U_{max} in Wasser von $U_{\text{max}} \sim 10 \text{ kV}$. Dies entspricht der maximal und nur kurzzeitig am Elektrolyten anliegenden Spitzenspannung bei einer Ladespannung von 20 kV. Die Dimensionierung von Stoßwellengenerator und Leistungsimpulsgenerator entsprechen somit dem bei ähnlichen Geräten eingesetzten Stand der Technik und stellen keine schwer beherrschbaren Anforderungen an die Komponenten.

[0036] In spezifischen Ausgestaltungen kann beim beschriebenen "Thermohydraulischen Stoßwellengenerator" sowohl auf eine konkave Formgebung der Elektroden als auch auf eine refraktive akustische Linse verzichtet werden. Dies kann dadurch erreicht werden, daß die Oberfläche einer akustisch reflektierenden ("harten") Elektrode so strukturiert ist, daß im Mittel eine plane oder konkave, fokussierende Oberfläche innerhalb zulässiger Toleranzen eingehalten wird, daß aber durch radialsymmetrische Strukturen eine Fokussierung ringförmiger Anteile der reflektierten ebenen Schallwelle auf einen gemeinsamen Fokus erfolgt. Die Strukturen müssen dabei in radialer Richtung so klein dimensioniert sein, daß sowohl die unvermeidlichen Abweichungen von der angestrebten gemeinsamen Fokuslage toleriert werden können, als auch die Spannungsfestigkeit zwischen den beiden Elektroden durch die ebenfalls unvermeidlichen Höhendifferenzen der Oberflächenstrukturen nicht beeinträchtigt wird.

[0037] Gemäß Figur 4 und Figur 5 erreicht man den gewünschten Effekt, indem in eine Elektrodenoberfläche 100

konzentrische Ringe 11 eingedreht werden, deren Oberfläche 111 mit der ursprünglich planen Elektrodenoberfläche einen bestimmten Winkel α einschließen, so daß die Ringoberflächen 111 zur Symmetrieachse der Elektrode hin geneigt sind. Die Ringe 11 können im Querschnitt jeweils eine Kegelform haben, wobei die Oberflächen 111 Kegelmantelflächen bilden. Auch andere Geometrien sind möglich. So können die Oberflächen der Ringe 11 gekrümmte Rotationskörperoberflächen bilden. Es sind Spheroid-, Ellipsoid- oder Paraboloidflächen möglich.

[0038] Der Winkel α wird so berechnet, daß die Normalenkegel durch die jeweilige Ringmitte mit ihrer Spitze alle im geforderten Fokuspunkt liegen. Dafür gilt die Beziehung

$$\sin \alpha = R_x / F$$

wobei R_x der mittlere Radius des x-ten Ringes und F der Abstand des Fokus von der Elektrodenoberfläche ist. Die Ringbreite wird vorteilhaft so gewählt, daß die maximalen Höhen der Ringe über der mittleren, d.h. planen Elektrodenoberfläche $< 0,25 \cdot d$ sind, wobei d der mittlere Elektrodenabstand ist. Dadurch wird die Spannungsfestigkeit der Anordnung nicht unzulässig erniedrigt. Eine zusätzliche Anforderung an die Ringbreite wird durch die zulässigen Abweichungen der Lage der Teilfokii vom gemeinsamen Fokus und der damit verbundenen Verbreiterung des Fokusedurchmessers erhoben.

[0039] Eine vorteilhafte Ausführung verwendet für die Oberflächen der eingedrehten Ringe keine Kegelmantelflächen als einfachste Ausführungsform, sondern Kugeloberflächen, deren Radien r_x so berechnet sind, daß eine Feinkorrektur der Wellenfront in Bezug auf die geforderte Fokusslage erfolgt:

$$r_x = F / \sin \alpha$$

[0040] Durch weitere Feinkorrekturen der beschriebenen Art lassen sich die nichtlinearen Effekte, die durch die Aufteilung der Druckwelle zu einer intensiven Stoßwelle hervorgerufen werden, ebenfalls korrigieren, so daß mit einer quasiplanaren Anordnung mit strukturierter Oberfläche eine fokussierende Anordnung mit hervorragender Fokusqualität erzeugt werden kann.

[0041] Die im einzelnen beschriebenen Eigenschaften dieser Anordnung führen zu einer Selbstfokussierung der in der oben zitierten Erfindungsmeldung erzeugten ebenen Schallwelle. Damit ergibt sich ein selbstfokussierender Druckwellengenerator, der extrem kompakt, einfach aufgebaut und von sehr hoher Lebensdauer ist. Ganz allgemein können mit der vorstehend beschriebenen Oberflächenstrukturierung jedoch auch beliebige anders erzeugte ebene oder auch gekrümmte Schallwellen in Reflexion fokussiert bzw. abgebildet werden.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Erzeugung von Stoßwellen für technische, vorzugsweise medizintechnische, Anwendungen, insbesondere für die Lithotripsie oder die Schmerztherapie, wobei durch Druckpulsationen akustische Wellen vorgegebener Wellenlänge hoher Energiedichte erzeugt werden, wozu mit Hilfe eines intensiven elektrischen Impulses elektrische Energie direkt und weitestgehend verlustfrei zur Aufheizung eines leitfähigen, flüssigen Elektrolyten umgesetzt wird und somit die Druckpulsationen über eine kurzzeitige Aufheizung des Elektrolyten erzeugt werden, mit einer Anordnung aus zwei Elektroden (1, 2; 7, 8: 21, 22, 31), die den leitfähigen, flüssigen Elektrolyten (3) einschließen und von einem Leistungsimpulsgenerator (5) angesteuert werden, wobei Mittel zur Auskopplung der Druckpulsationen als Schallwellen in ein Schallausbreitungsmedium (4) vorhanden sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der leitfähige, flüssige Elektrolyt eine Flüssigkeitsschicht (3) bildet, die an ihren großflächigen Oberflächen von den beiden Elektroden (1, 2, 21, 22) begrenzt ist, die zur Stromeinkopplung benutzt werden und von denen mindestens eine Elektrode (1,2) die Auskopplung der entstehenden Schallwellen ermöglicht.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektroden (7, 8) die Flüssigkeitsschicht (3) an ihren Schmalseiten begrenzen und zur Stromeinkopplung benutzt werden, wobei die Auskopplung der entstehenden Schallwelle durch eine isolierende Membran (10) ermöglicht wird.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektrodenanordnung eine erste feststehende massive Elektrode (1, 21, 31) und eine zweite dünne, leichte Elektrode (2, 22) im vorgegebenen Abstand von der ersten Elektrode (1, 21) enthält, wobei zwischen den Elektroden (1, 2, 21, 22) sich der Elektrolyt (3) vorgegebener

Schichtdicke (5) befindet.

- 5 5. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektrodenanordnung eine erste feststehende massive Elektrode (1) und eine zweite Elektrode (2) im vorgegebenen Abstand von der ersten Elektrode (1) enthält, wobei die zweite Elektrode (2) aus einem Gitter hoher Transmission besteht.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektroden (1, 2, 7, 8, 21, 22, 31) aus korrosionsbeständigen Materialien bestehen.
- 10 7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit der ersten Elektrode (1) deutlich größer ist als die diesbezüglichen Produkte des Elektrolyten (3) und des Schallausbreitungsmediums (4).
- 15 8. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit des Elektrolyten (3) einerseits und des Schallausbreitungsmediums (4) andererseits in etwa gleich groß sind und in etwa dem von Wasser entsprechen.
- 20 9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß ebene Elektroden (1, 2) vorhanden sind, mit denen eine ebene Schallwellenfront erzeugt wird.
- 25 10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Elektrodenanordnung (1, 2) eine akustische Linse nachgeschaltet ist.
- 30 11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß die schallharte Elektrode (1) eine Strukturierung (11, 111) der Oberfläche (100) aufweist.
- 35 12. Vorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Strukturierung in konzentrischen Ringen (11) besteht, deren Oberflächen (111) mit der Elektrodenfläche (100) einen vorgegebenen Winkel einschließen.
- 40 13. Vorrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ringe (11) im Querschnitt jeweils eine Kegelform haben.
- 45 14. Vorrichtung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Oberflächen (111) der Ringe (11) Kegelmantelflächen bilden.
- 50 15. Vorrichtung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Oberflächen (111) der Ringe (11) konkav gekrümmte Rotationskörperoberflächen, wie beispielsweise Spheroidflächen, Ellipsoidflächen oder Paraboloidflächen, bilden.
- 55 16. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß mindestens eine, vorzugsweise jedoch zwei konkav ausgebildete Elektroden (21, 22) vorhanden sind, mit denen eine gekrümmte Wellenfront erzeugt wird.
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Leistungsimpulsgenerator (5) aus einem LC-Glied und einem elektronischen Schaltelement besteht.
18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, daß die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten (3) so eingestellt wird, daß die Leistungsanpassung an den Leistungsimpulsgenerator (5) optimiert ist.
19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß Mittel zur Entgasung des Elektrolyten (3) vorgesehen sind.
20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß Mittel zur Feinfilterung des Elektrolyten (3) vorgesehen sind.
21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Elektrolyt (3) eine Flüssigkeit verwendet wird, deren Wert $(\Delta V/V_0)/W$ möglichst groß ist, wobei $\Delta V/V_0$ die relative Volumenänderung pro eingetragener Energie W ist.

22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Elektrolyt (3) aus einfachen Alkoholen, z.B. Ethanol oder Methanol, mit ionenleitfähigen Zusätzen besteht.
23. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Elektrolyt (3) aus höherwertigen Alkoholen, beispielsweise Ethylenglykol oder Glycerin mit ionenleitfähigen Zusätzen, besteht.
24. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektrodenform optimiert ist zur Erzeugung eines problemangepaßten, nicht punktförmigen Fokus.
25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, 10 bis 15 oder 17 bis 24, **dadurch gekennzeichnet**, daß mindestens eine, vorzugsweise jedoch zwei konvex ausgebildete Elektroden vorhanden sind, mit denen eine gekrümmte divergierende Schallwellenfront erzeugt wird.

Claims

1. Apparatus for generating shock waves for technical, preferably medical, applications, in particular for lithotripsy or pain therapy, wherein acoustic waves of specified wavelength and high energy density are generated by pressure pulsations, for which purpose electrical energy is converted with the aid of an intense electrical pulse directly and very largely without loss for the purpose of heating a conductive liquid electrolyte and consequently the pressure pulsations are generated during a brief heating of the electrolyte using an arrangement comprising two electrodes (1, 2; 7, 8; 21, 22, 31) that enclose the conductive liquid electrolyte (3) and are controlled by a power pulse generator (5), wherein means are present for coupling out the pressure pulsations as sound waves into a sound propagation medium (4).
2. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the conductive liquid electrolyte forms a liquid layer (3) that is bounded at its large-area surfaces by the two electrodes (1, 2, 21, 22) that are used for coupling in the current and of which at least one electrode (1, 2) makes it possible to couple out the sound waves produced.
3. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the electrodes (7, 8) form the boundary of the liquid layer (3) at its narrow sides and are used to couple out the current, wherein an insulating diaphragm (10) makes it possible to couple out the sound wave produced.
4. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the electrode arrangement contains a first, fixed solid electrode (1, 21, 31) and a second thin, lightweight electrode (2, 22) at a specified distance from the first electrode (1, 21), wherein the electrolyte (3) having a specified layer thickness (5) is situated between the electrodes (1, 2, 21, 22).
5. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the electrode arrangement contains a first, fixed solid electrode (1) and a second electrode (2) at a specified distance from the first electrode (1), wherein the second electrode (2) comprises a grid with high transmission.
6. Apparatus according to one of Claims 1 to 5, characterized in that the electrodes (1, 2, 7, 8, 21, 22, 31) are composed of corrosion-resistant materials.
7. Apparatus according to one of Claims 1 to 6, characterized in that the product of mass density and sound velocity of the first electrode (1) is markedly greater than the products in this respect of the electrolyte (3) and of the sound propagation medium (4).
8. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the product of mass density and sound velocity of the electrolyte (3), on the one hand, and of the sound propagation medium (4), on the other hand, are approximately equal and correspond approximately to that of water.
9. Apparatus according to one of Claims 1 to 6, characterized in that flat electrodes (1, 2) are present that generate a flat sound-wave front.
10. Apparatus according to one of Claims 1 to 6, characterized in that an acoustic lens is connected downstream of the electrode arrangement (1, 2).

11. Apparatus according to one of Claims 1 to 6, characterized in that the acoustically hard electrode (1) has a structuring (11, 111) of the surface (100).
12. Apparatus according to Claim 11, characterized in that the structuring comprises concentric rings (11) whose surfaces (111) enclose with the electrode surface (100) a specified angle.
13. Apparatus according to Claim 12, characterized in that the rings (11) each have a conical shape in cross section.
14. Apparatus according to Claim 13, characterized in that the surfaces (111) of the rings (11) form lateral cone surfaces.
15. Apparatus according to Claim 13, characterized in that the surfaces (111) of the rings (11) form concavely curved surfaces of rotational bodies, such as, for example, spheroidal surfaces, ellipsoidal surfaces or paraboloidal surfaces.
16. Apparatus according to Claim 1, characterized in that at least one, but preferably two concavely constructed electrodes (21, 22) are present that generate a curved wave front.
17. Apparatus according to one of Claims 1 to 16, characterized in that the power-pulse generator (5) comprises an LC member and an electronic switching element.
18. Apparatus according to one of Claims 1 to 17, characterized in that the electrical conductivity of the electrolyte (3) is adjusted so that the power matching to the power-impulse generator (5) is optimized.
19. Apparatus according to one of Claims 1 to 18, characterized in that means are provided for degassing the electrolyte (3).
20. Apparatus according to one of Claims 1 to 19, characterized in that means are provided for finely filtering the electrolyte (3).
21. Apparatus according to one of Claims 1 to 20, characterized in that a liquid whose value of $(\Delta V/V_0)/W$ is as large as possible, where $\Delta V/V_0$ is the relative change in volume per unit of energy W introduced, is used as electrolyte (3).
22. Apparatus according to one of Claims 1 to 21, characterized in that the electrolyte (3) is composed of simple alcohols, for example ethanol or methanol, containing ion-conductive additives.
23. Apparatus according to one of Claims 1 to 22, characterized in that the electrolyte (3) is composed of higher polyvalent alcohols, for example ethylene glycol or glycerol, containing ion-conductive additives.
24. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the electrode shape is optimized to generate a nonpunctiform focus that is matched to the problem.
25. Apparatus according to one of Claims 1 to 8, 10 to 15 or 17 to 24, characterized in that at least one, but preferably two convexly constructed electrodes are present that generate a curved, divergent sound-wave front.

Revendications

1. Dispositif de production d'ondes de choc pour des applications techniques, de préférence des applications de la technique médicale, notamment pour la lithotripsie ou la thérapie de la douleur, des ondes acoustiques de longueur d'onde prescrite de grande densité d'énergie étant produites par des pulsations de pression, de l'énergie électrique étant transformée à l'aide d'une impulsion électrique intense directement et dans une grande mesure sans pertes pour chauffer un électrolyte liquide conducteur et ainsi les pulsations de pression étant produites par un chauffage de courte durée de l'électrolyte, comprenant un dispositif constitué de deux électrodes (1, 2 ; 7, 8 ; 21, 22, 31) qui inclut l'électrolyte (3) liquide conducteur et qui est commandé par un générateur (5) d'impulsions de puissance, des moyens étant prévus pour faire sortir les impulsions de pression sous forme d'ondes sonores dans un milieu (4) de propagation du son.
2. Dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce que l'électrolyte liquide conducteur forme une couche (3)

de liquide, qui est délimitée sur ses grandes surfaces par les deux électrodes (1, 2 ; 21, 22) qui sont utilisées pour l'injection de courant électrique et dont au moins une électrode (1, 2) permet la sortie des ondes sonores créées.

- 5 3. Dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce que les électrodes (7, 8) délimitent par leurs petits côtés la couche (3) de liquide et sont utilisées pour l'injection de courant électrique, la sortie des ondes sonores créées étant rendue possible à travers une membrane (10) isolante.
- 10 4. dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce que le dispositif à électrode comporte une première électrode (1, 21, 31) massive fixe et une deuxième électrode (2, 22) légère mince à une distance prescrite de la première électrode (1, 21), l'électrolyte (3) en une épaisseur (5) de couche prescrite se trouvant entre les électrodes (1, 2, 21, 22).
- 15 5. Dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce que le dispositif à électrode comprend une première électrode (1) massive fixe et une deuxième électrode (2) à une distance prescrite de la première électrode (1), la deuxième électrode (2) étant constituée d'une grille à grande transmission.
- 20 6. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que les électrodes (1, 2, 7, 8, 21, 22, 31) sont en un matériau résistant à la corrosion.
- 25 7. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le produit de la masse volumique par la vitesse du son de la première électrode (1) est nettement plus grand que les produits correspondants pour l'électrolyte (3) et pour le milieu (4) de propagation du son.
8. Dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce que le produit de la masse volumique par la vitesse du son de l'électrolyte (3) d'une part et du milieu (4) de propagation du son d'autre part sont à peu près égaux et correspondent à peu près à celui de l'eau.
- 30 9. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il est prévu des électrodes (1, 2) planes par lesquelles on produit un front d'ondes sonore.
10. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'une lentille acoustique est montée en aval du dispositif (1, 2) à électrode.
- 35 11. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que l'électrode (1) ayant de la raideur acoustique comporte une structuration (11, 111) de la surface (100).
12. Dispositif suivant la revendication 11, caractérisé en ce que la structuration est constituée d'anneaux (11) concentriques dont la surface (111) fait un angle prescrit avec la surface (100) de l'électrode.
- 40 13. Dispositif suivant la revendication 12, caractérisé en ce que les anneaux (11) ont en section transversale respectivement une forme conique.
14. Dispositif suivant la revendication 13, caractérisé en ce que les surfaces (111) des anneaux (11) forment des surfaces latérales de cône.
- 45 15. Dispositif suivant la revendication 13, caractérisé en ce que les surfaces (111) des anneaux forment des surfaces de révolution concaves, comme par exemple des surfaces sphéroïdales, ellipsoïdales ou paraboloidales.
- 50 16. Dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce qu'au moins une, mais de préférence deux électrodes (21, 22) concaves sont présentes grâce auxquelles on produit un front d'onde courbé.
17. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 16, caractérisé en ce que le générateur (5) d'impulsions de puissance est constitué d'un élément LC et d'un élément électronique interrupteur.
- 55 18. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 17, caractérisé en ce que la conductivité électrique de l'électrolyte (3) est réglée de façon à optimiser l'adaptation de puissance au générateur (5) d'impulsions de puissance.
19. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 18, caractérisé en ce qu'il est prévu des moyens de dégazage de

l'électrolyte (3).

20. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 19, caractérisé en ce qu'il est prévu des moyens de filtration fine de l'électrolyte (3).

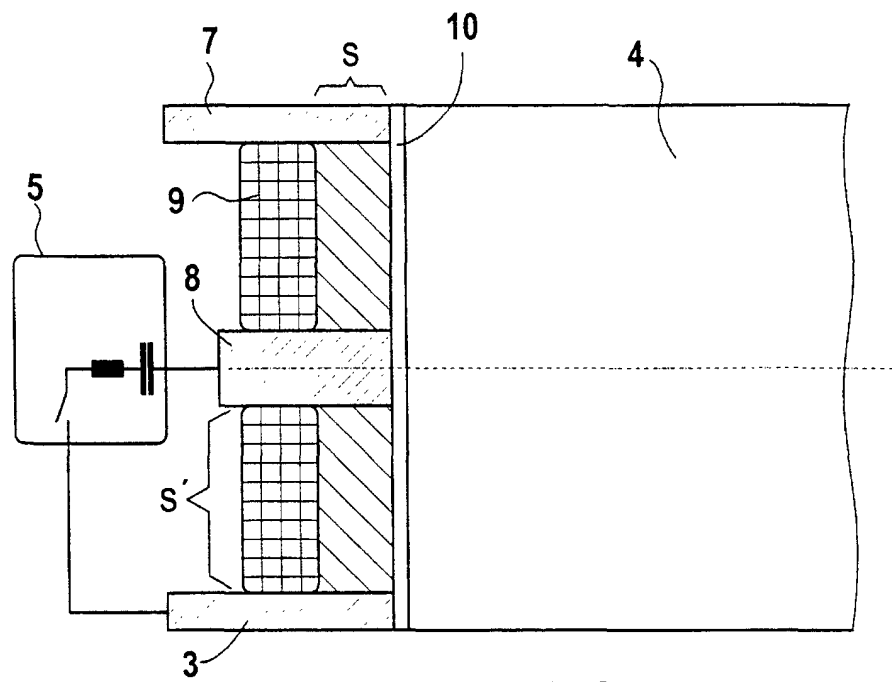
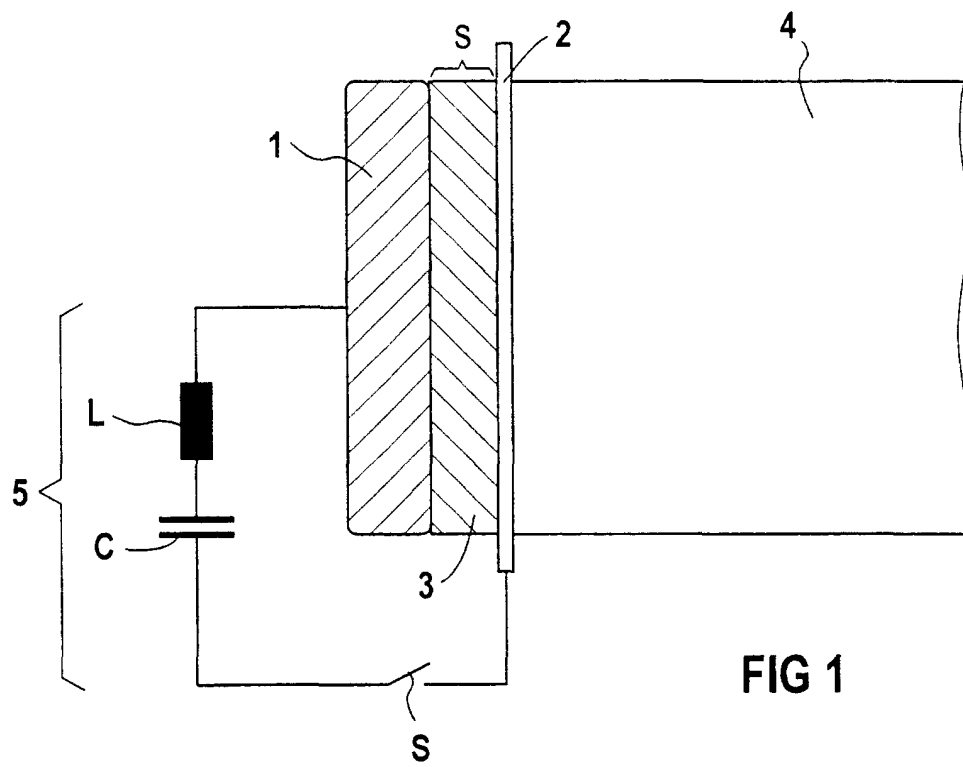
21. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 20, caractérisé en ce qu'il est utilisé comme électrolyte (3) un liquide dont la valeur $(\Delta V/V_0)/W$ est aussi grande que possible $\Delta V/V_0$ étant la variation relative de volume par énergie W apportée.

22. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 21, caractérisé en ce que l'électrolyte (3) est constitué d'un alcool simple, par exemple d'éthanol ou de méthanol, avec des additifs aptes à conduire les ions.

23. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 22, caractérisé en ce que l'électrolyte (3) est en un alcool ayant plusieurs fonctions alcool, par exemple en éthylèneglycol ou en glycérine avec des additifs aptes à conduire les ions.

24. Dispositif suivant la revendication 1, caractérisé en ce que la forme de l'électrode est optimisée pour produire un foyer non ponctuel adapté au problème.

25. Dispositif suivant l'une des revendications 1 à 8, 10 à 15 ou 17 à 24, caractérisé en ce qu'il est prévu au moins une, mais de préférence deux électrodes convexes grâce auxquelles on produit un front d'onde sonore courbé divergeant.



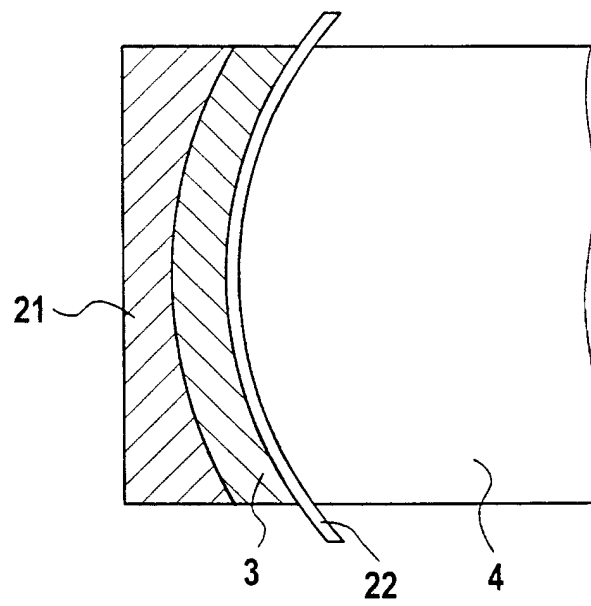


FIG 3

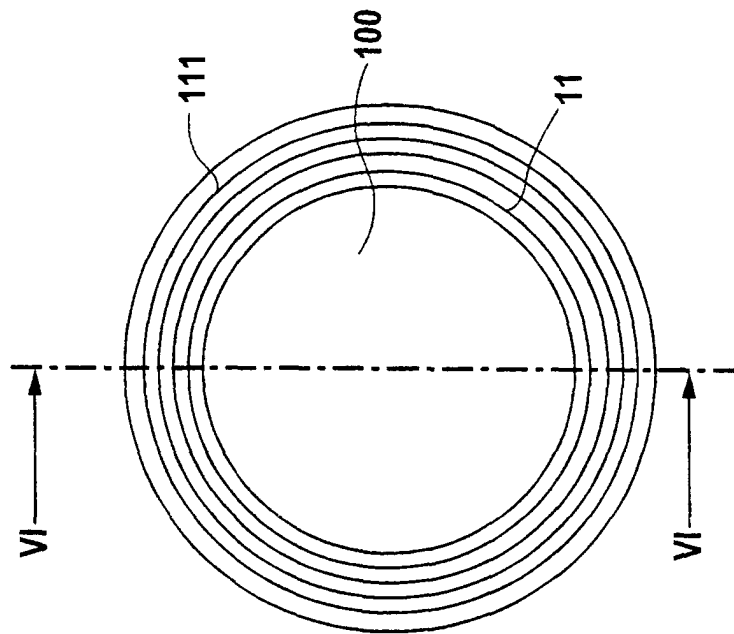


FIG 4

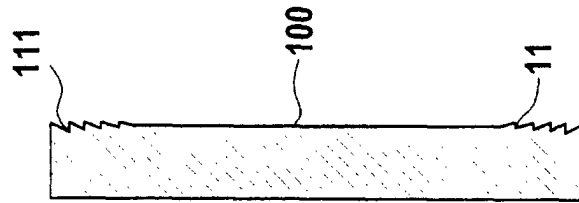


FIG 5