(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Veröffentlichungsnummer: **0 012 938**
A2

(12) # EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: **79105117.0**

(51) Int. Cl.³: **G 10 K 11/32**

(22) Anmeldetag: **12.12.79**

(30) Priorität: **20.12.78 DE 2855143**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
09.07.80 Patentblatt 80/14

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT CH DE FR GB NL

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
Postfach 22 02 61
D-8000 München 22(DE)

(72) Erfinder: **Weyns, Arthur, Dipl.-Ing.**
"Ten Weynranken" Willendries 5
B-2960 Muizen(BE)

(54) **Ultraschallwandler mit optimaler lateraler Auflösung und Verfahren zur Herstellung desselben.**

(57) Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung von Ultraschallwandlern, mit einem fokussierenden Ultraschallschwinger mit Aussparung in der Aktivfläche. Wünschenswert ist eine Ausbildung des Wandlers dahingehend, daß sich bei beliebig vorgebbaren Werten der Fokusbreite und des Fokusabstandes optimale laterale Auflösung bei geringstmöglichem Einfluß von Nebenkeulen ergibt. Dies wird erreicht durch Herstellung in den folgenden Schritten:
a) für zuerst Fokusbreite (FB) oder Fokusabstand (FA) wird in Abhängigkeit vom Krümmungsradius (R) des Schwingers (1; 5) dessen Außenabmessung (2ao) oder in Abhängigkeit von der Außenabmessung (2ao) der Krümmungsradius (R) festgelegt;
b) dann wird für die andere der beiden Fokusgrößen (z.B. FA) die noch nicht bestimmte Größe Außenabmessung bzw. Krümmungsradius festgelegt;
c) der sich so ergebende Maximalwert des Öffnungswinkels des Schallstrahlungsfeldes hinter dem Fokus wird durch geeignete Größenwahl (2ao) der Aussparung (2, 8) in der Aktivfläche des Schwingers so eingeengt, daß das Verhältnis zwischen Öffnungswinkel und Nebenkeulen optimal wird (Fig. 1)

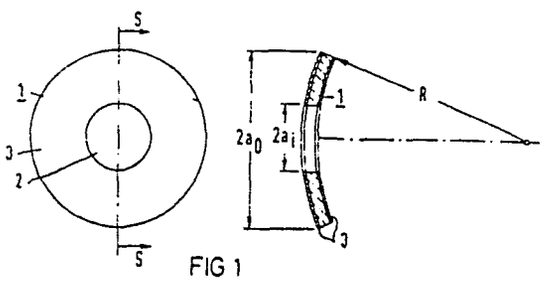


FIG 1

EP 0 012 938 A2

BEZEICHNUNG GEÄNDERT
siehe Titelseite

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
Berlin und München

Unser Zeichen
VPA 78 P 5148 EUR

Verfahren zur Herstellung von Ultraschallwandlern

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung von Ultraschallwandlern, mit wenigstens einem Ultraschallschwinger, dessen durch Hilfsmittel künstlich fokussierende Aktivfläche Aussparungen aufweist und dessen Schallstrahlungsfeld nach Fokusabstand, Fokusbreite und Öffnungswinkel im Anschluß an den Fokus und Ultraschallfrequenz vorgebbar sein soll.

In der Ultraschalltechnik, insbesondere auf dem elektromedizinischen Gebiet oder auf dem Gebiet der Werkstoffprüfung, besteht der Wunsch nach optimaler Anpassung des Schallstrahlungsfeldes des jeweiligen Ultraschallschwingers an die Gegebenheiten. So soll der Fokusabstand beispielsweise immer optimal an den jeweiligen Abstand des Untersuchungsortes von der Schwingerfläche einstellbar sein. Die Fokusbreite und der Öffnungswinkel des Schallstrahlungsfeldes sollen ebenfalls möglichst klein sein, damit die laterale Auflösung optimal

wird. Der Einfluß von Nebenkeulen des Schallstrahlungsfeldes soll möglichst gering sein. Alle diese Bedingungen sollen schließlich für jeden beliebigen Anwendungszweck, also z.B. für Ultraschallgeräte mit oder ohne Wasservorlaufstrecke oder sonstiger Ausbildung, gegeben sein. Bekannte Verfahren zur Herstellung von Ultraschallwandlern erlauben bisher nicht eine eindeutig optimale Abstimmung zwischen Fokusabstand, Fokusbreite und Öffnungswinkel des Schallstrahlungsfeldes, wie dies eigentlich erwünscht ist. So beschreibt die Zeitschrift "Journal of Acoustical Society of America", Vol. 44, No. 5, 1968 auf den Seiten 1310 bis 1318, insbesondere jedoch auf der Seite 1312, ein solches Herstellungsverfahren, bei dem die Einzelwerte nicht separat voneinander vorgebbar und variierbar sind. Die gemäß dem Verfahren hergestellten Ultraschallschwinger sind außerdem nur für Dauerschall, nicht jedoch auch für Puls-Echo-Betrieb ausgelegt. Bei Anwendung im Puls-Echo-Betrieb ergeben sich automatisch und unweigerlich größere Werte für Fokusabstand und Fokusbreite bzw. auch Öffnungswinkel, was eigentlich unerwünscht ist. Bei Ultraschallschwingern läßt sich die laterale Auflösung dadurch verbessern, daß Fokus und Öffnungswinkel des Schallstrahlungsfeldes hinter dem Fokus so klein wie möglich eingestellt werden. Bei Ultraschallwandlern mit oder ohne Wasservorlaufstrecke ist bekanntlich ein kleiner Öffnungswinkel durch Vergrößerung der aktiven Schwingerfläche oder durch Vorgabe eines schwächeren Krümmungsradius der künstlichen Fokussierung (mechanisch oder elektronisch) des Schwingers erreichbar. Eine vergrößerte aktive Schwingerfläche oder ein schwächerer Krümmungsradius führen jedoch immer zu einer Verbreiterung des Schallstrahlungsfeldes im Fokus und dahinter. Das Ergebnis ist eine Verschlechterung der lateralen Auflösung sowohl im Fokus als auch im dahinterliegenden Untersuchungsgebiet des Schallfeldes. Wird von diesen Maßnahmen abgesehen, d.h.

wird also die Schwingerfläche verkleinert oder wird stärker künstlich fokussiert, so wird zwar die laterale Auflösung direkt im Fokus verbessert. Unmittelbar hinter dem Fokus verschlechtert sich jedoch die laterale Auflösung rapide, da gegenüber vorher der Öffnungswinkel jetzt erheblich größer ist. Dies gilt in diesem Sinne auch für die im Aufsatz "A real-time B-scanner with improved lateral resolution" von C. B. Burckhardt et al unterbreiteten Vorschläge zur Herstellung von stark fokussierten Schwingern. So ist beispielsweise der in der Fig. 1 auf der Seite 82 dargestellte sphärisch gekrümmte Schwinger geometrisch stark fokussiert, so daß sich für verschiedene dB-Keulen nahe beieinanderliegende Fokusse und damit gute laterale Auflösung in diesem Bereich ergeben. Hinter diesem Fokusbereich steht jedoch ein sehr großer Öffnungswinkel an, der die laterale Auflösung sofort wieder rapide verschlechtert. Der Bereich guter lateraler Auflösung ist damit in unerwünschter Weise auf ein viel zu kleines Untersuchungsgebiet eingeschränkt. Der in der Fig. 2 auf der Seite 82 des Aufsatzes dargestellte Ultraschallwandler ist ringförmig aufgebaut, wobei gemäß der Fig. 4 auf der Seite 84 der Ring aus einzelnen aufeinanderfolgenden Teilelementen besteht. Die Ringform des Schwingers begünstigt die Ausbildung von Interferenzstrukturen. Dadurch ergibt sich relativ starke Fokussierung und kleiner Öffnungswinkel und damit auch gute laterale Auflösung. Das verstärkte Vorhandensein von Interferenzstrukturen bringt jedoch ein Anwachsen des Einflusses von Nebenkeulen mit sich. Diese Nebenkeulen führen zu Bildverfälschungen.

Aufgabe vorliegender Erfindung ist es, Ultraschallwandler dahingehend auszubilden, daß sich bei beliebig vorgebbaren Werten der Fokusbreite und des Fokusabstandes optimale laterale Auflösung bei geringstmöglichem Ein-

fluß von Nebenkeulen ergibt.

Die Aufgabe wird mit einem Verfahren gelöst, das erfindungsgemäß durch die folgenden Schritte gekennzeichnet ist:

a) für die vorgebbaren zwei Fokusgrößen Fokusbreite und Fokusabstand wird in Abhängigkeit entweder vom Krümmungsradius des Ultraschallschwingers dessen Außenabmessung oder in Abhängigkeit von der Außenabmessung der Krümmungsradius für zuerst eine der beiden Fokusgrößen festgelegt;

b) bei der so festgelegten Außenabmessung oder dem so festgelegten Krümmungsradius wird dann für die andere der beiden vorgebbaren Fokusgrößen die noch nicht bestimmte Größe Krümmungsradius bzw. Außenabmessung festgelegt;

c) der sich für Außenabmessung und Krümmungsradius gemäß den Schritten a) und b) ergebende Maximalwert des Öffnungswinkels des Schallstrahlungsfeldes hinter dem Fokus wird schließlich durch Einbringung einer Aussparung in die Aktivfläche des Ultraschallschwingers solcher Größe so eingeengt, daß sich optimales Verhältnis zwischen Öffnungswinkel und Nebenkeulen des Schallstrahlungsfeldes ergibt.

Ein nach dem Verfahren gemäß der Erfindung hergestellter Ultraschallwandler ist dann erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, daß ein gemäß den Schritten a) und b) in der Außenabmessung und im Krümmungsradius der Fokussierung festgelegtes Schwingerformteil durch mechanische Ausnehmung (z.B. durchgehendes Loch oder oberflächenseitige Kontaktschichtaussparung) eines Teiles des Schwingermaterials oder ein zumindest elektrisch in Ein-

zelstrahlflächen unterteilter Schwinger durch elektrische Abschaltung einzelner Flächenteile in der Aktivfläche ausgespart ist.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der Zeichnung in Verbindung mit den Unteransprüchen. Es zeigen

Fig. 1 einen gemäß dem Verfahren nach der Erfindung hergestellten kompakten Ringschwinger mit mechanischer Fokussierung;

Fig. 2 einen gemäß dem Verfahren nach der Erfindung hergestellten Ringschwinger in Matrixform zur elektronischen Fokussierung;

Fig. 3 ein praktisches Ausführungsbeispiel für einen gemäß der Erfindung hergestellten Ringschwinger und Diagramme, die den mit diesem Ringschwinger erreichten Verlauf der lateralen Auflösung über der Eindringtiefe im Vergleich mit Verläufen von nach herkömmlichen Verfahren hergestellten Ultraschallschwingern aufzeigen;

Fig. 4 einen Ultraschallschwinger in Form eines Ultraschall-Arrays mit einer Mischform aus mechanischer und elektrischer Ausnehmung.

Die Fig. 1 zeigt einen Ringschwinger 1 aus z.B. piezokeramischem Material. Im vorliegenden Fall weist der Ringschwinger 1 ein durchgehendes Loch 2 als mechanische Ausnehmung auf. Ebensogut kann anstelle eines durchgehenden Loches eine Aussparung in einer Kontaktschicht 3 vorhanden sein. Der mit der Ausnehmung 2 ver-

sehene Ringschwinger 1 ist mit dem Krümmungsradius R mechanisch gekrümmt. Anstelle dieser mechanischen Krümmung kann selbstverständlich auch ein Planarschwinger mit elektronischer Krümmung oder eine Mischform aus beidem gewählt werden. In den beiden letzteren Fällen muß zur Erzeugung der für die elektronische Krümmung (elektronische Fokussierung) erforderlichen Verzögerungszeiten das kompakte Wandlerformteil in Einzelsegmente 4 unterteilt sein. Dieser Sachverhalt ist z.B. in der Fig. 2 angedeutet.

Ein Schwinger der Fig. 1 bzw. 2 wird nun gemäß der Erfindung wie folgt hergestellt:

Zuerst werden für den jeweils erwünschten Anwendungsfall Fokusbreite F_B und Fokusabstand F_A in ihren optimalen Werten vorgegeben. Die Fokusbreite F_B ist jedoch, wie auch der Fokusabstand F_A, eine Funktion vom Krümmungsradius R der Fokussierung und der äußeren Abmessung a_0 des Schwingers. Damit ergibt sich die Beziehung für die Fokusbreite (bezogen auf eine bestimmte Anzahl von Schwingungen innerhalb des Erregungs- und/oder Echoimpulses) zu

$$F_B = f(R, a_0) \qquad (1)$$

Dasselbe gilt auch für den Fokusabstand F_A mit der Beziehung

$$F_A = g\ (R, a_0) \qquad (2)$$

Aus (1) ergibt sich durch Umrechnung auf a_0 die Beziehung

$$a_0 = F_1\ (R, F_B) \qquad (3)$$

oder

$$R = F_2 (a_0, F_B) \quad (4)$$

Aus (2) in Verbindung mit (3) ergibt sich dann

$$R = G_1 (F_A, F_1 (R, F_B) \quad (5)$$

oder aus (2) in Verbindung mit (4)

$$a_0 = G_2 (F_A, F_2 (a_0, F_B) \quad (6)$$

Aus Gründen der Vereinfachung empfiehlt sich die Ermittlung zuerst von (3) in Abhängigkeit von einem normierten Radius R_N, der wie folgt definiert ist:

$$R_N = R / \frac{a_0^2}{\lambda} \quad (7)$$

In diesem Falle bestimmen sich bei völliger Frequenzunabhängigkeit automatisch aus R_N die relative Fokusbreite F_B/a_0 und der normierte Fokusabstand $F_A / \frac{a_0^2}{\lambda}$. Somit wird aber auch automatisch das richtige Maß für die Außenabmessung $2a_0$ in Abhängigkeit von R_N festgelegt. Aus dem Vergleich des vorgegebenen Fokusabstandes F_A mit dem in Abhängigkeit von R_N bei vorgegebener Betriebsfrequenz erhaltenen Fokusabstand F_A läßt sich dann aber der notwendige Wert R_N festlegen. Damit ist jedoch auch die Außenabmessung $2a_0$ festgelegt, so daß sich aus den Größen R_N und $2a_0$ jetzt der tatsächliche Krümmungsradius R erhalten läßt. Der sich mit den festgelegten Werten für Außenabmessung und Krümmungsradius ergebende Maximalwert des Öffnungswinkels des Schallstrahlungsfeldes hinter dem Fokus kann nun in einfacher Weise durch Abstimmung der Größe $2a_i$ der Aussparung in der Aktivfläche des Ultraschallschwingers so eingeengt werden, daß sich ein der Gerätekonzeption entsprechendes

optimales Verhältnis zwischen Öffnungswinkel und Nebenkeulen des Schallstrahlungsfeldes ergibt.

Die Fig. 3 zeigt ein praktisches Ausführungsbeispiel für einen Ringschwinger gemäß der Fig. 1, der z.B. für die Betriebsfrequenz von f = 3,5 MHz einen Außendurchmesser $2a_0$ = 40 mm und eine innere Ausnehmung mit einem Durchmesser von $2a_i$ = 13 mm aufweist. Der Krümmungsradius ist mit R = 242 mm bestimmt. Die links daneben gezeigten Diagramme zeigen von oben nach unten für die -6dB-Keule, die -20dB-Keule und die -40dB-Keule des Schallstrahlungsfeldes die sich mit diesem Schwinger gemäß der Erfindung ergebenden Verläufe der lateralen Auflösung La (mm) über der Eindringtiefe Te (cm) des Ultraschalles im Untersuchungsgebiet. Es ist deutlich zu ersehen, daß der die Erfindung betreffende Verlauf I der lateralen Auflösung in sämtlichen drei Diagrammen im interessierenden Eindringtiefenbereich von etwa 0 bis 13 cm deutlich besser verläuft als die Verläufe II und III solcher Ultraschallwandler, die nach herkömmlichen Verfahren hergestellt wurden.

Die Fig. 4 zeigt ein Alternativbeispiel zu den Fig. 1 und 2. Gemäß diesem Alternativbeispiel kann der Ultraschallschwinger in Form eines Arrays 5 aus einer Vielzahl von nebeneinander angeordneten Einzelelementen 6 (z.B. zwischen 60 und 160 Elementen) aufgebaut sein. Bei derartigen Ultraschallschwingern in Array-Form geschieht die zeilenweise Fortführung des Ultraschallstrahles zum Aufbau eines Ultraschallbildes durch Fortschaltung der Einzelelemente 6 in Gruppen. Beim Array der Fig. 4 sind derartige Gruppen beispielsweise mit 7 bezeichnet. Die Festlegung der inaktiven Fläche kann elektronisch oder mechanisch erfolgen. Im Ausführungsbeispiel der Fig. 4 liegt eine Mischform vor. So ist z.B. jede fortzuschaltende Gruppe 7 durch elektrische

Abschaltung von Einzelelementen innerhalb der Gruppe mit einer inneren Aussparung 8 versehen. Diese Aussparung 8 verläuft jeweils quer zur Längsrichtung des Arrays. Eine weitere Aussparung 9, die im vorliegenden Fall jedoch nicht elektronisch, sondern mechanisch ausgelegt ist, verläuft in Längsrichtung des Arrays. Die Abmessungen $2a_{01}$, $2a_{i1}$ bzw. $2a_{02}$, $2a_{i1}$ beider Aussparungen 8 bzw. 9 bestimmen sich gemäß Schritt c) des erfindungsgemäßen Verfahrens. Im Ausführungsbeispiel der Fig. 4 bestimmt die Gruppe 7 an Einzelelementen in Verbindung mit der elektrischen Aussparung 8 den Krümmungsradius der Fokussierung gemäß der Erfindung in der z, x-Ebene des eingezeichneten Koordinatensystems. Die Fokussierung in der z,y-Ebene ist durch die gezeichnete mechanische Krümmung der Array-Einzelelemente in Verbindung mit der mechanischen Aussparung 9 gemäß der Erfindung vorbestimmt. Anstelle der mechanischen Krümmung kann zum Zwecke der Fokussierung selbstverständlich auch eine elektronische Fokussierung vorgenommen werden. In diesem Falle muß lediglich das Array in den Einzelelementen matrixartig entsprechend dem Ausführungsbeispiel der Fig. 2 aufgebaut sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Ultraschallwandlern, mit wenigstens einem Ultraschallschwinger, dessen durch Hilfsmittel künstlich fokussierende Aktivfläche Aussparungen aufweist und dessen Schallstrahlungsfeld nach Fokusabstand, Fokusbreite und Öffnungswinkel im Anschluß an den Fokus und Ultraschallfrequenz vorgebbar sein soll, gekennzeichnet durch die folgenden Schritte:

a) für die vorgebbaren zwei Fokusgrößen Fokusbreite (F_B) und Fokusabstand (F_A) wird in Abhängigkeit entweder vom Krümmungsradius (R) des Ultraschallschwingers (1; 5) dessen Außenabmessung ($2a_0$) oder in Abhängigkeit von der Außenabmessung ($2a_0$) der Krümmungsradius (R) für zuerst eine der beiden Fokusgrößen (z.B. F_B) festgelegt;

b) bei der so festgelegten Außenabmessung oder dem so festgelegten Krümmungsradius wird dann für die andere der beiden vorgebbaren Fokusgrößen (z.B. F_A) die noch nicht bestimmte Größe Krümmungsradius bzw. Außenabmessung festgelegt;

c) der sich für Außenabmessung ($2a_0$) und Krümmungsradius (R) gemäß den Schritten a) und b) ergebende Maximalwert des Öffnungswinkels des Schallstrahlungsfeldes hinter dem Fokus wird schließlich durch Einbringung einer Aussparung (2; 8, 9) in die Aktivfläche des Ultraschallschwingers (1; 5) solcher Größe ($2a_i$) so eingeengt, daß sich optimales Verhältnis zwischen Öffnungswinkel und Nebenkeulen des Schallstrahlungsfeldes ergibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch ge-

k e n n z e i c h n e t, daß bei Vorgabe einer der beiden Fokusgrößen die Außenabmessung ($2a_0$) des Ultraschallschwingers (1; 5) in Abhängigkeit vom auf das Verhältnis a_0^2/λ, mit a_0 als halbe Außenabmessung des Ultraschallschwingers und λ als Ultraschallwellenlänge, normierten Krümmungsradius ($R_N = R/\frac{a_0^2}{\lambda}$) festgelegt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß bei so in Abhängigkeit von R_N festgelegter Außenabmessung ($2a_0$) für die andere vorgegebene Fokusgröße der normierte Krümmungsradius (R_N) sowie der tatsächliche Wert $2a_0$ und aus diesen dann schließlich der wirkliche Krümmungsradius (R) festgelegt wird.

4. Nach einem Verfahren entsprechend den Ansprüchen 1 bis 3 hergestellter Ultraschallwandler, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß ein gemäß den Schritten a) und b) in der Außenabmessung ($2a_0$) und im Krümmungsradius (R) der Fokussierung festgelegtes Schwingerformteil (1; 5) durch mechanische Ausnehmung (2 oder 9) (z.B. durchgehendes Loch oder oberflächenseitige Kontaktschichtaussparung) eines Teiles des Schwingermaterials oder ein zumindest elektrisch in Einzelstrahlflächen (6) unterteilter Schwinger (5) durch elektrische Abschaltung einzelner Flächenteile (8) in der Aktivfläche ausgespart ist.

5. Ultraschallwandler nach Anspruch 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß ein mit mechanischer Ausnehmung (2) versehener Schwinger (1) als Ringschwinger, vorzugsweise in Kreis- oder Ovalform, ausgebildet ist.

6. Ultraschallwandler nach Anspruch 5, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß der Ringschwinger (1) in Kompaktform aus einem einzigen Materialteil (Fig.1) gebildet oder durch Aneinanderreihung von einzelnen Schwingerelementen (Fig. 2) zu einem Ring zusammengesetzt ist.

7. Ultraschallwandler nach Anspruch 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß ein in linearer oder matrixartiger Aneinanderreihung von Einzelelementen (6) kammförmig aufgebauter Ultraschallschwinger (5) (Fig.4) in einer Gruppe (8) von Einzelsegmenten innerhalb der Gesamtzahl aller oder weiterer Gruppen (7) der Einzelsegmente abschaltbar ist, wobei die ausgeschnittene Gruppe (8) in der Flächenform die Abmessungen der Aussparung festlegt.

8. Ultraschallwandler nach Anspruch 7, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß der Schwinger (5) zusätzlich mechanische Aussparungen (9) in der Aktivfläche aufweist.

9. Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 4 bis 8, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß zur Festlegung des Krümmungsradius (R) der Fokussierung gemäß Schritt b) ein Ultraschallschwinger mit Aussparung dient, der

a) entweder schon vorab mechanisch mit dem erwünschten Krümmungsradius der Fokussierung gekrümmt ist (Fig.1),

b) oder planar ausgebildet ist und mit dem Krümmungsradius rein elektronisch fokussiert ist (Fig. 2),

c) oder eine Kombination aus mechanischer und elektronischer Fokussierung vorliegt (z.B. Fig. 4).

10. Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 4 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein mit der Fokusbreite $F_B = f(R, a_0)$ und dem Fokusabstand $F_A = g(R, a_0)$ vorgebbarer Ultraschallschwinger mit Aussparung in der Aktivfläche wie folgt dimensioniert ist:

a) die äußere Abmessung beträgt

$$a_0 = F_1 (R, F_B)$$

b) der Krümmungsradius beträgt bei dieser Außenabmessung

$$R = G_1 (F_A, F_1 (R, F_B))$$

c) die Aussparung hat eine innere Abmessung bei diesen Werten von solcher Größe $2a_i$, bei der das Verhältnis zwischen Öffnungswinkel und Nebenkeulen des Schallstrahlungsfeldes optimal ist.

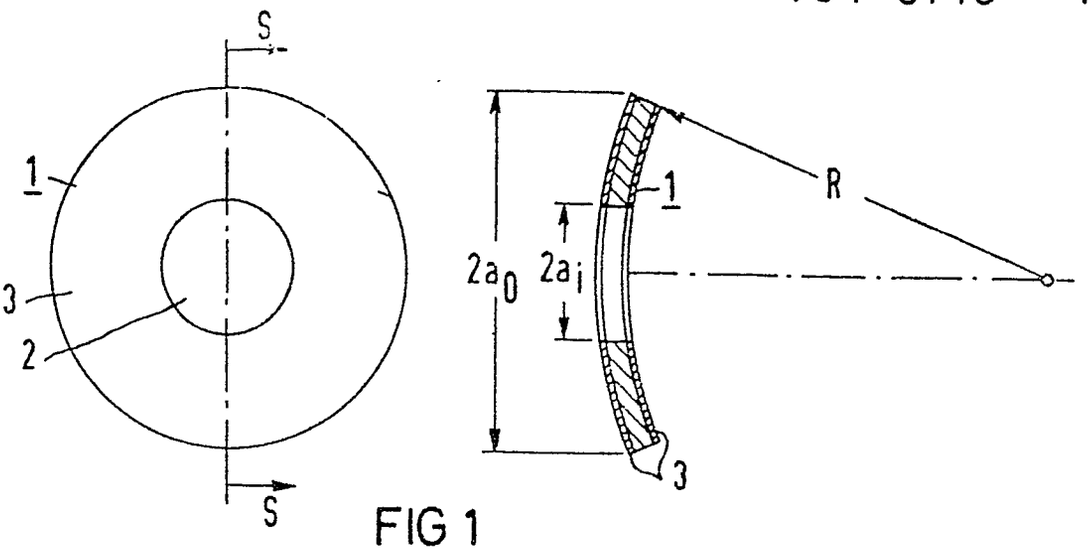


FIG 1

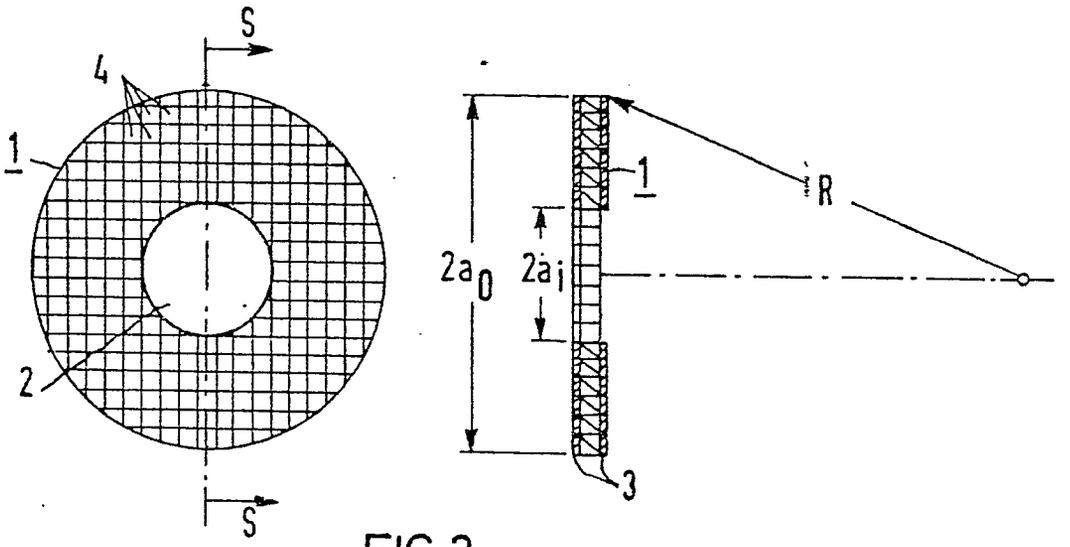


FIG 2

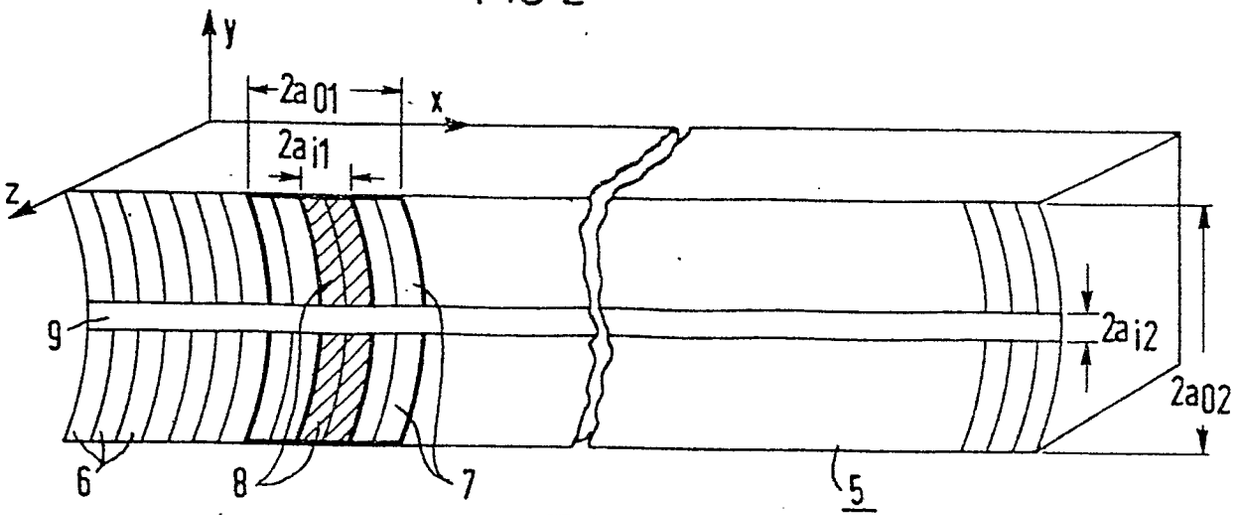
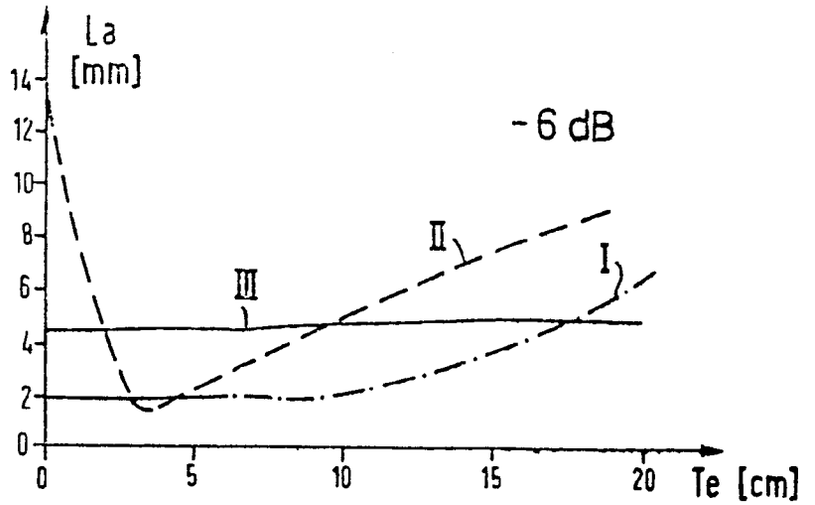
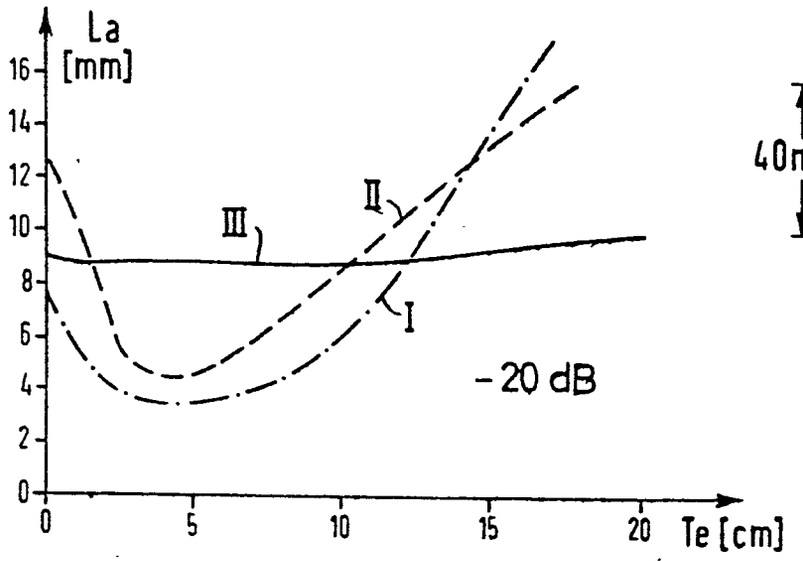
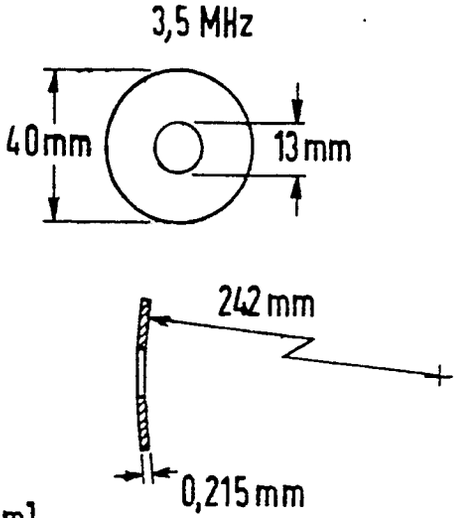


FIG 4


La
[mm]
-6 dB
I
II
III
Te [cm]


La
[mm]
-20 dB
I
II
III
Te [cm]


3,5 MHz
40mm
13mm
242 mm
0,215 mm

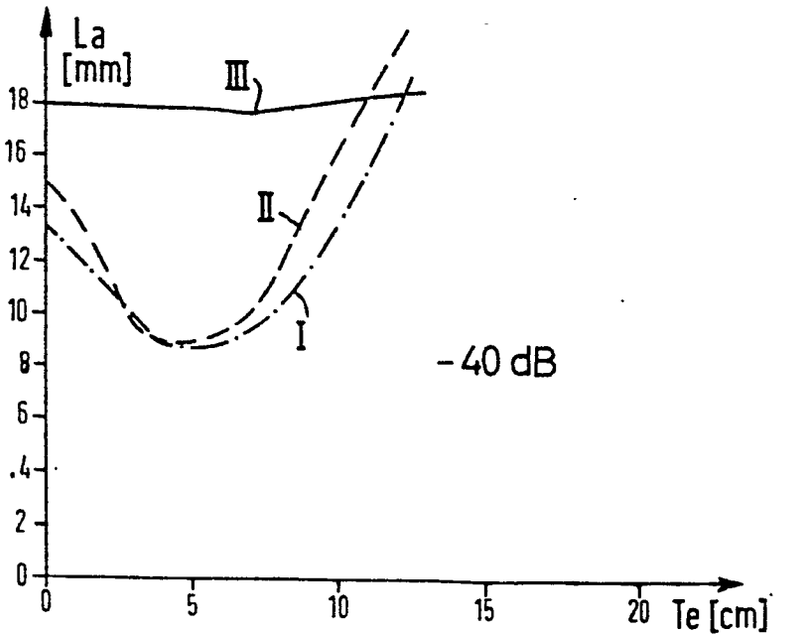

La
[mm]
-40 dB
I
II
III
Te [cm]

FIG 3