

12

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: 80103161.8

51 Int. Cl.³: **F 23 D 11/34, B 05 B 17/06,**
B 06 B 3/02

22 Anmeldetag: 09.06.80

30 Priorität: 08.06.79 US 46641

71 Anmelder: **SONO-TEK CORPORATION, 313 Main Mall,**
Poughkeepsie, N.Y. 12601 (US)

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung: 07.01.81
Patentblatt 81/1

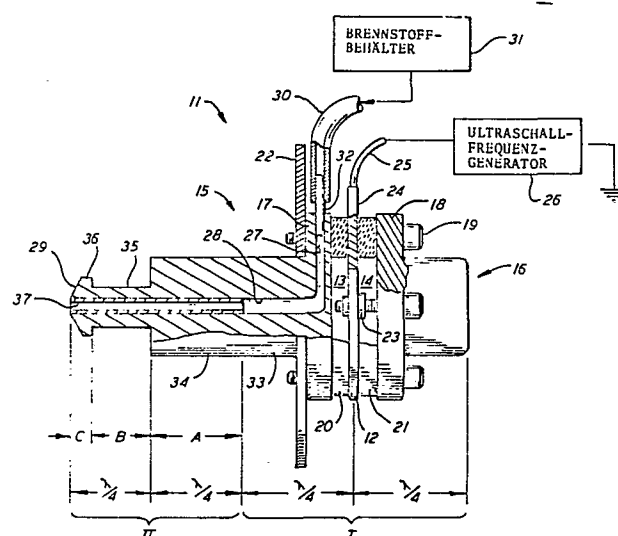
72 Erfinder: **Berger, Harvey L., 311 Cooper Road,**
Poughkeepsie, N.Y. 12601 (US)
Erfinder: **Brandow, Charles R., 11 Lisa Drive, Highland,**
N.Y. (US)

84 Benannte Vertragsstaaten: **AT BE CH DE FR GB IT LI LU**
NL SE

74 Vertreter: **Becker, Maria, Dipl.-Phys., Auf dem Haigst 29,**
D-7000 Stuttgart 70 (DE)

54 **Ultraschall-Zerstäuber für flüssige Brennstoffe.**

57 Ultraschallzerstäuber mit einem abgestuften Verstärkerabschnitt und einer mit einem Flansch versehenen Zerstäuberspitze. Die Stirnfläche des Flansches ist kegelförmig und gibt ein kegelförmiges Sprühmuster. Die Längen des Verstärkerabschnitts und der mit einem Flansch versehenen Spitze sind für optimale Ergebnisse miteinander in Beziehung gesetzt.



EP 0 021 194 A2

A 2792

Stuttgart, 5.6.1980

v/sw

SONO-TEK CORPORATION

Poughkeepsie, N.Y. 12601 (V.St.A.)

Ultraschallzerstäuber für flüssige
Brennstoffe.

Die Erfindung betrifft einen Ultraschallzer-
stäuber für Flüssigbrennstoffe, insbesondere
einen Ultraschallwandler für Ultraschallzer-
stäuber, und stellt eine Verbesserung des in der
5 US-Patentschrift 4 153 201 vom 8. Mai 1979
offenbarten Ultraschallzerstäubers dar.

Wie in der dieser US-Patentschrift entsprechenden
deutschen Offenlegungsschrift 27 49 859 bereits
10 ausgeführt, läßt sich der Zerstäubungswirkungs-
grad eines mit einer Sonde versehenen elektro-
mechanischen Ultraschallwandlers dadurch verbes-
sern, daß man der Sonde eine Spitze mit vergröß-
ertem Durchmesser in Form eines starren Flansches
15 gibt, und daß die Form des zerstäubten flüssigen
Brennstoffes und die Dichte des zerstäubten
flüssigen Brennstoffes durch die geometrischen
Umrisse der mit einem Flansch versehenen, zer-
stäubenden Oberfläche beeinflußt werden kann.
20 Beispielsweise bewirkt eine senkrecht zur Sonden-

achse angeordnete ebene Fläche ein ganz bestimmtes Muster und eine ganz bestimmte Dichte der zerstäubten Flüssigkeit. Ist die Oberfläche konvex gekrümmt, dann ist der Strahl der zerstäubten Flüssigkeit breiter, und man findet weniger zerstäubte Teilchen je Flächeneinheit der Querschnittsfläche als mit einer ebenen Oberfläche. Eine konkav gekrümmte Oberfläche verengt die Form des Strahls und die Dichte der Teilchen im Strahl ist größer als bei einer ebenen Oberfläche.

Bei Anwendungsgebieten, bei denen ein Ultraschallwandler dieser Art als Zerstäuber in einem mit flüssigem Brennstoff betriebenen Brenner verwendet wird, ist es oft erwünscht, einen kegelförmigen Strahl mit einem weiten Öffnungswinkel von etwa 60° zu erzeugen. Zerstäuber mit kugelförmig konvexen Zerstäubungsoberflächen haben sich jedoch nicht als vollkommen zufriedenstellend für die Erzeugung eines derartigen Strahls erwiesen. Versuchsergebnisse zeigten, daß sich nur ein Winkel von etwa der Hälfte des vorher gesagten Winkels im Strahl erzeugen ließ. Ferner hat sich gezeigt, daß eine mit einem starren Flansch versehene Wandler Spitze mit einer kugelförmig konvexen, zerstäubenden Oberfläche sehr schwierig anzusteuern war, wobei sehr starke Leistungsimpulse erforderlich waren, um den Brennstoff zu zerstäuben. Eine derartig instabile Arbeitsweise ist jedoch für Brennstoffzerstäuber, wie sie bei Ölbrennern in Haushalten oder in

Industrieanlagen verwendet werden, nicht
annehmbar. Andererseits haben Wandler mit
einer einen starren Flansch aufweisenden
Spitze und mit planaren Zerstäubungsoberflächen
5 stabil und mit gutem Wirkungsgrad gearbeitet,
jedoch ist der durch die ebene Zerstäubungs-
oberfläche erzeugte Strahl nicht weit genug
aufgefächert, um eine gute Durchmischung mit
der einströmenden Luft und eine gute Flamme in
10 den üblichen Hochdruckdüsen von Ölbrennern zu
erzeugen.

Aufgabe der Erfindung ist es also, einen Ultra-
schallzerstäuber mit einer derartigen Zerstäu-
15 bungsOberfläche zu schaffen, die einen stabilen,
halbflüssigen, kegelförmigen Strahl mit einem
vorbestimmten Scheitelwinkel und einer gleich-
förmigen Verteilung der zerstäubten Teilchen
von praktisch der gesamten ZerstäubungsOber-
20 fläche liefert.

Dies wird gemäß der vorliegenden Erfindung durch
einen Ultraschallzerstäuber mit einem Treiber,
einem an den Treiber angekoppelten Ultraschall-
25 hornabschnitt und einer verstärkenden Sonde mit
einer Zerstäubungsoberfläche am äußeren Ende der
Sonde geschaffen, wobei der ZerstäubungsOber-
fläche eine Flüssigkeitsströmung zugeführt wird,
wobei die Verbesserung darin besteht, daß die
30 Zerstäubungsoberfläche kegelförmig ausgestaltet
ist, wobei der Öffnungswinkel dem Ergänzungs-

winkel eines vorbestimmten Zerstäubungswinkels für den Zerstäuber entspricht.

Vorzugsweise bildet die kegelförmige Zerstäu-
5 bungsOberfläche die Stirnseite eines starren
Flansches, dessen Grundliniendurchmesser größer
ist als der Durchmesser der Sonde, und die zu
zerstäubende Flüssigkeit wird durch eine sich
axial durch die Sonde hindurch erstreckende
10 Bohrung zugeführt und trifft dabei auf eine
radial verlaufende Leitung für die Brennstoff-
zufuhr, die angenähert in einer Ebene eines
Schwingungsknotenpunktes des Wandlers angeordnet
ist. Die gesamte Länge der Sonde mit verringertem
15 Durchmesser und der mit einem Flansch versehenen
Spitze sollte kleiner sein als die theoretisch
errechnete Viertel-Wellenlänge in dem Material
des Wandlers für dessen Betriebsfrequenz, und
die relative Länge der Sonde und der Spitze sollte
20 in Bezug auf ihre jeweiligen Durchmesser so be-
stimmt werden, daß eine größtmögliche Schwingungs-
amplitude bei der Vibration der ZerstäuberOber-
fläche erreicht wird. Für die optimale Länge von
Sonde und Spitze, wie sie aus der Lösung der
25 grundlegenden Wellengleichung bestimmt ist, lassen
sich Schwingungsamplituden für eine mit einem
kegelstumpfförmigen Flansch versehene Spitze er-
zielen, die etwa 97 Prozent der maximal mit einer
einfachen zylinderförmigen Sonde erzielbaren
30 Amplitude entspricht, wodurch man eine wesentlich
vergrößerte ZerstäuberOberfläche erhält, wobei

- 5 -

jedoch die Schwingungsamplitude nur unwesentlich verringert ist.

Die Erfindung wird nunmehr anhand einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung in Verbindung mit den beigegeführten Zeichnungen im einzelnen näher beschrieben.

In den Zeichnungen zeigt

- 10 Figur 1 eine Seitenansicht, teilweise
 im Schnitt, eines Zerstäuberwandlers
 gemäß der Erfindung,
 Figur 2 eine vergrößerte Teilansicht
 der Sonde mit der mit einem Flansch ver-
15 sehenen Spitze gemäß Fig. 1, und
 Figur 3 ein Diagramm der Longitudinal-
 Schwingungsamplitude, aufgetragen
 über dem Abstand längs der verstär-
 kenden Sonde gemäß der Erfindung.

20

- In Fig. 1 ist ein elektromechanischer Ultraschall-
 wandler 11 gezeigt, der aus einer scheibenförmigen
 Elektrode 12 besteht, die zwischen einem Paar
 piezoelektrischen Scheiben 13 und 14 angeordnet
25 ist, die wiederum zwischen einem vorderen Zer-
 stäuberteil 15 und einem hinteren Ausgleichsab-
 schnitt 16 liegen. Die vorderen und hinteren Ab-
 schnitte sind mit der Verschraubung dienenden
 Flanschen 17 bzw. 18 versehen, und das Ganze wird
30 mit Kopfschrauben 19 zusammengehalten, die durch
 ausgerichtete Bohrungen in den Flanschen 17

und 18 in ringförmigen Dichtungen 20 und 21 und in der scheibenförmigen Elektrode 12 hindurchgesteckt werden, bevor sie in Gewindebohrungen in einer Montageplatte 22 eingeschraubt werden.

5

Zur Vermeidung eines Kurzschlusses sind die Schrauben 19 von isolierenden Manschetten 23 umgeben, die die Bohrungen in der scheibenförmigen Elektrode durchsetzen. Eine Anschlußklemme 24
10 auf der Oberseite der scheibenförmigen Elektrode dient dem Anschluß eines Kabels 25, das mit einem Ultraschallfrequenzgenerator 26 üblicher Bauart verbunden ist. Da die Montageplatte normalerweise Teil einer elektrisch geerdeten Apparatur,
15 wie z.B. eines Ölbrenners, ist oder an diesem befestigt ist, sind damit alle anderen Teile mit Ausnahme der scheibenförmigen Elektrode geerdet, so daß dadurch über die Erdverbindung des Ultraschallfrequenzgenerators eine geschlossene Erd-
20 verbindung geschaffen ist. Damit baut sich über den beiden piezoelektrischen Scheiben 13 und 14 zwischen der scheibenförmigen Elektrode 12 und den vorderen und rückwärtigen Abschnitten des Wandlers eine Wechselspannung mit vorbestimmter Ultra-
25 schallfrequenz auf.

Der vordere Zerstäuberabschnitt 15 des Wandlers enthält in dem Flansch 17 eine radial sich erstreckende Bohrung 27, die auf eine axial ver-
30 laufende Bohrung 28 trifft, die sich durch den vorderen Abschnitt bis zu einer Öffnung in der

Mitte der Zerstäuberoberfläche 29 erstreckt.
Eine Zuleitung 30 verbindet einen Brennstoff-
vorratsbehälter 31 über ein kurzes Rohrstück
32, das in die Bohrung 27 eingesetzt wird oder
5 über eine sonst übliche Ankopplung mit der
Bohrung 27.

Funktional gesehen, umfaßt der Wandler 11 einen
symmetrischen, doppelt ausgeglichenen Ultra-
10 schalltreiber I und einen Schwingungsverstärker
II. Der Treiber besteht dabei aus der scheiben-
förmigen Elektrode 12, den beiden piezoelektri-
schen Scheiben 13 und 14, dem rückwärtigen Aus-
gleichsabschnitt 16 und einem Teil 33 des vorderen
15 Zerstäuberteils 15 mit Abmessungen, die mit dem
rückwärtigen Ausgleichsabschnitt 16 identisch
sind. Damit bildet der Abschnitt 33 des vorderen
Zerstäuberteils 15 einen vorderen Ausgleichsab-
schnitt, der im wesentlichen an den rückwärtigen
20 Ausgleichsabschnitt 16 angepaßt ist.

Der verbleibende Teil des vorderen Zerstäuber-
teils 15 bildet den Schwingungsverstärker II,
der aus einem ersten zylinderförmigen Abschnitt
25 34 mit dem gleichen Durchmesser wie der Ausgleichs-
teil 33 mit einer Länge A und aus einem zweiten
zylinderförmigen Abschnitt 35 in Form einer Sonde
von wesentlich kleinerem Durchmesser als der
zylinderförmige Abschnitt 34 mit einer Länge B
30 besteht, sowie aus einem dritten Abschnitt 36,
der die Form einer mit Flansch versehenen Spitze

aufweist, deren Länge C und deren Durchmesser größer ist als der der Sonde, jedoch beträchtlich kleiner als der des Abschnitts 34. Vorzugsweise ist das Innere der Bohrung 28, mindestens in dem
5 dem Verstärkerabschnitt II entsprechenden Auslaßteil, ausgekleidet, vorzugsweise mit einer der Entkopplung dienenden Manschette 37, die aus einem Material besteht, das bei Ultraschallfrequenzen eine sehr hohe Dämpfung aufweist. Für diesen
10 Zweck wird Polytetrafluoräthylen vorzugsweise benutzt, da es außerdem durch Brennstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis und auch durch die meisten anderen Flüssigkeiten, die zerstäubt werden müssen, nicht angegriffen wird.

15 Obgleich der Schwingungsverstärker II ein untrennbarer Teil des vorderen Zerstäuberabschnitts ist, so ist es doch erwünscht, für bestes Betriebsverhalten den Wandler in zwei Stufen zu entwerfen.

20 In der ersten Stufe wird ein Versuchsaufbau eines Wandlers hergestellt, der mit dem Treiberteil I des endgültigen Wandleraufbaus, d.h. mit dem längssymmetrischen Wandler mit doppeltem Ausgleich identisch ist.

25 Die Länge dieses Versuchswandleraufbaus errechnet sich dann gleich der halben Wellenlänge λ bei einer versuchsweise ausgewählten Betriebsfrequenz f aus der Gleichung

30
$$\lambda = c/f,$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit in dem für die

Vorder- und rückwärtigen Abschnitte gewählten Material ist. Dieses Material sollte den Schall sehr gut leiten. Aluminium, Titan, Magnesium und deren Legierungen sind gute Beispiels geeigneter Materialien, jedoch können auch andere
5 Materialien verwendet werden.

Der Wandlerversuchsaufbau wird dann zur Bestimmung der tatsächlichen Resonanzfrequenz untersucht.

10 Da die berechnete Länge auf einer reinen Longitudinalschwingung in einem homogenen Zylinder mit konstantem Durchmesser basiert, der aus dem Wandlmaterial des vorderen und rückwärtigen Abschnitts besteht, vernachlässigt man den Einfluß
15 der Flansche, der Montageplatte, der Halteschrauben, der verschiedenen Materialien der scheibenförmigen Elektrode und der piezoelektrischen Scheiben, der Dichtungsringe, die unvollkommene Anpassung der Oberflächen zwischen den Elementen und eine Befestigung außerhalb eines Knotenpunkts, die Ankopplung der Brennstoffleitung und der Bohrungen
20 und andere Abweichungen von dem theoretischen Modell. Diese Auswirkungen sind schwierig und in den meisten Fällen überhaupt nicht analytisch
25 zu erfassen, aber kumulativ verschieben sie die tatsächliche Resonanzfrequenz des doppelt ausgeglichenen Wandlers um einen ganz wesentlichen Betrag aus der theoretisch errechneten Resonanzfrequenz heraus. Benutzt man die experimentell
30 bestimmte Resonanzfrequenz als Betriebsfrequenz des Zerstäubers, dann erhält man einen abgegli-

chenen Treiber, der sich bei optimalem Wirkungsgrad betreiben läßt.

- Wenn größere Anstrengungen durch das beabsichtigte Anwendungsgebiet gerechtfertigt sind, kann man eine genauere Voraussage der tatsächlichen Resonanzfrequenz des Treibers dadurch erhalten, daß man berücksichtigt, daß jede Viertel-Wellenlänge des vorderen und rückwärtigen Abschnittes aus drei zylinderförmigen Elementen unterschiedlicher Durchmesser, Dichte und Schallübertragungsgeschwindigkeit, entsprechend dem piezoelektrischen Element, dem Flansch bzw. dem Abschnitt mit kleinerem Durchmesser, zusammengesetzt ist. Mit vorgegebenen Abmessungen des piezoelektrischen Elements und des Flanschs läßt sich die Länge des Abschnitts mit kleinerem Durchmesser dadurch ermitteln, daß man die bekannte Wellen-Differentialgleichung durch die Bedingung löst, in der das elektroden-seitige Ende des Abschnitts in einer Knotenpunktebene liegt (Auslenkung Null), während das andere Ende des Ausgleichsabschnitts an einem Schwingungsbauch liegt (Beanspruchung Null).
- Im zweiten Abschnitt wird ein neuer vorderer Zerstäuberabschnitt hergestellt, der den abgestuften Verstärkungsabschnitt mit der Länge A enthält, wobei die Länge B und C als Viertellänge der empirisch in der ersten Stufe bestimmten Betriebsfrequenz errechnet wird. Da der Verstärkerabschnitt einstückig aus homogenem Material mit einfachen

Abmessungen besteht, können die Längenabmessungen A, B und C, die durch Lösung der Wellengleichung bestimmt worden sind, zum Aufbau eines Abschnitts herangezogen werden, dessen Resonanzfrequenz sehr
5 nahe an der für die Berechnungen verwendeten Betriebsfrequenz liegt. Mit anderen Worten, wenn man den Wandler gedanklich in einen abgeglichenen Treiberteil I zerlegt, dessen Resonanzfrequenz nur durch Versuch genau bestimmt werden kann und
10 einen Verstärkerabschnitt, dessen Resonanzfrequenz ohne allzu ungewöhnliche Schwierigkeiten theoretisch vorhergesagt werden kann, läßt sich ein vollständiger Zerstäubungswandler konstruieren, bei dem für einen Betrieb mit optimalem Wirkungs-
15 grad Treiberteil und Verstärkerteil aneinander angepaßt sind.

Dieses Entwurfsverfahren für einen Wandler für Ultraschallzerstäuber ist in der oben angegebenen
20 US-Patentschrift 4,153,201 ausführlich beschrieben, wobei ebenfalls angegeben ist, daß es sehr erwünscht ist, am Ende der verstärkenden Sonde einen starren Flansch als Zerstäuberspitze zu verwenden, wobei angegeben ist, daß für beste
25 Ergebnisse die gesamte Länge der Sonde und der mit Flansch versehenen Spitze, d.h. B+C, kleiner sein sollte als die Länge A des Verstärkerteils mit größerem Durchmesser. Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß die mit einem starren Flansch
30 versehene Spitze der Sonde am Ende der Sonde eine Massebelastung ergibt, wodurch der Ort der

Ebene mit der höchsten Schwingungsamplitude um einen merklichen Betrag verschoben wird gegenüber einer glatten Sonde ohne vergrößerte Spitze.

5

Gemäß der oben genannten Patentschrift wurde eine ebene Zerstäuberoberfläche senkrecht zur Achse der Sonde bevorzugt, da alle Bereiche einer solchen Oberfläche mit der gleichen Amplitude
10 schwingen, wenn die Spitze bei der Betriebsfrequenz des Wandlers starr ist. Gleichzeitig war vorgeschlagen worden, daß eine konvex gekrümmte Zerstäuberoberfläche in solchen Fällen Verwendung finden könnte, bei denen eine weitere Ver-
15 teilung der zerstäubten Teilchen erwünscht war. Wie jedoch bereits dargelegt, haben nachfolgende Untersuchungen ergeben, daß derartige konvexe Zerstäuberoberflächen nicht sonderlich zufriedenstellend arbeiteten.

20

Eine genaue Beobachtung der konvexen Zerstäuber-
oberfläche unter Betriebsbedingungen ließ erkennen, daß die Zerstäubung der Flüssigkeit auf einen eng begrenzten, ringförmigen Bereich in
25 unmittelbarer Nachbarschaft der Auslaßöffnung der Zuleitung beschränkt war, wo die Zerstäuber-
oberfläche im wesentlichen senkrecht zur Sonden-
achse verlief. In den weiter außen gelegenen
Bereichen, bei denen die konvexe Zerstäuber-
30 fläche einen zunehmend größeren Winkel mit dieser senkrechten Ebene bildet, wurden nur sehr kleine

Mengen der Flüssigkeit zerstäubt. Aus diesen Ergebnissen könnte man annehmen, daß eine abgewinkelte Oberfläche für eine Zerstäubung einer Flüssigkeit in einen Weitwinkelstrahl unwirksam
5 sein würde.

Überraschenderweise wurde jedoch festgestellt, daß eine kegelförmige oder kegelstumpfförmige Zerstäuberoberfläche gemäß der Erfindung bei
10 Versuchen außergewöhnlich gute Ergebnisse lieferte. Die Beobachtungen bei den Versuchen zeigen, daß die Flüssigkeit auf der gesamten Kegeloberfläche zerstäubt wird und daß die Zerstäubungsrichtung etwa senkrecht auf der konischen Oberfläche
15 steht. Daraus folgt, daß man einen gewünschten Öffnungswinkel für einen Strahl lediglich dadurch erzielen kann, daß man eine kegelförmige oder kegelstumpfförmige Zerstäuberoberfläche wählt, die einen komplementären Öffnungswinkel auf-
20 weist. Beispielsweise wird eine kegelförmige Zerstäubungs-oberfläche mit einem Öffnungswinkel von 120° einen im wesentlichen kegelförmigen Strahl mit einem Öffnungswinkel von 60° liefern.

25 In Fig. 2 ist eine vergrößerte Teilseitenansicht des äußeren Endes des Verstärkerabschnitts des in Fig. 1 gezeigten Wandlers dargestellt mit einer mit einem Flansch mit kegelstumpfförmiger Oberfläche versehenen Spitze.

30

Wie im Falle der ebenen Zerstäuberoberfläche gibt eine mit Flansch versehene Spitze wegen

der vergrößerten Zerstäubungsfläche bessere Ergebnisse. Außerdem ist es sehr wichtig, daß der Flansch starr ist. Somit sollte die äußere Kante der kegelstumpfförmigen Oberfläche 29 von
 5 einem kurzen zylinderförmigen Basisteil 38 umgeben sein. Die Länge dieses Basisteils 38 sollte für die notwendige Starrheit ausreichen und sicherstellen, daß die Zerstäuberoberfläche gleichförmig vibriert und sich nicht bei der
 10 Betriebsfrequenz des Wandlers verbiegt, da es wünschenswert ist, die Masse der mit einem Flansch versehenen Spitze für einen vorgegebenen Durchmesser und Kegelwinkel möglichst klein zu halten.

15 Da die Gesamtlänge von Sonde und Spitze einen kritischen Einfluß auf die Schwingungsamplitude der Zerstäubungsfläche ausübt, ist es außerordentlich wichtig, daß die Längen B der Sonde 35 und C der Spitze 36 so genau wie möglich bestimmt werden. Für den Fall einer an ihrer Spitze
 20 mit einem Flansch mit ebener Oberfläche versehenen Sonde sind die Grenzbedingungen für die Differential-Wellengleichung einfach, so daß eine analytische Lösung relativ einfach zu erhalten ist.
 25 Für eine an ihrer Spitze mit einem Flansch versehene Sonde mit einem zylinderförmigen Flansch und einer ebenen Zerstäuberoberfläche wurde die folgende Beziehung zwischen den Längen B und C analytisch ermittelt:

$$30 \quad (\tan k B) (\tan k C) = S_1 / S_2,$$

wobei $k = 2\pi f/c$

$S_1 =$ Querschnittsfläche der Sonde

$S_2 =$ Querschnittsfläche des Flansches

ist.

Die analytische Lösung für eine kegelförmige Spitze ist wesentlich schwieriger und komplexer als für eine zylindrische Spitze, da der Durchmesser der Spitze über die Länge nicht konstant ist. Ein Versuch, eine brauchbare kegelförmige Spitze für eine Zerstäubersonde dadurch zu konstruieren, daß man die Gleichung für die zylinderförmige Spitze nahm und die kegelförmige Spitze gedanklich durch einen "äquivalenten" Zylinder ersetzte, war jedoch nicht erfolgreich.

Der Grund für diese Näherung lag darin, daß die relativen Massen der Sonde und der Spitze die wohl wichtigsten Faktoren sind, die die jeweiligen Längenabmessungen beeinflussen. Demzufolge sollte eigentlich eine kegelförmige Spitze mit der gleichen Masse wie eine "äquivalente" zylinderförmige Spitze die gleiche Schwingungsamplitude haben. Trotzdem hat ein Zerstäuber mit einer kegelförmigen Spitze mit Abmessungen, die aufgrund dieser vereinfachten Annahme ermittelt waren, keine zufriedenstellende Zerstäubung geliefert. Dieses Ergebnis, wenn es zusammen mit dem gleichfalls wenig zufriedenstellenden Ergebnis der früher erwähnten Versuche mit einem Wandler mit einer kugelförmig konvexen Spitze der Sonde zusammen betrachtet wird, legt den Schluß nahe, daß eine abgewinkelte Oberfläche für eine zufriedenstellende Zerstäubung nicht geeignet ist.

Überraschenderweise wurde jedoch gefunden, daß man eine gute Zerstäubung mit einem Zerstäuber

erhält, der eine kegelförmige Spitze aufweist, dessen Abmessungen exakt durch strenge analytische Lösung ermittelt wurden. Dies zeigt klar den kritischen Einfluß, den selbst geringe Abwei-
5 chungen in den Abmessungen auf das Betriebsverhalten eines Zerstäubers für den Fall einer kegelförmigen Zerstäuberoberfläche ausüben können.

Das analytische Verfahren zur Ermittlung der
10 richtigen Abmessungen eines eine Viertel-Wellenlänge langen Abschnittes einer verstärkenden Sonde mit einer mit Flansch versehenen Spitze mit kegelstumpfförmiger Zerstäuberoberfläche soll nunmehr beschrieben werden.

15 In Fig. 3 sind die Sonde mit geringem Durchmesser und die kegelstumpfförmige Spitze des Verstärkerabschnitts der Fig. 2 etwa maßstabsgerecht in einem Diagramm dargestellt, in dem die norma-
20 lisierte Schwingungsamplitude über dem axialen Abstand aufgetragen ist. Die x-Koordinate bezeichnet damit die Position in axialer Richtung und die r-Koordinate bezeichnet die radiale Richtung. Die Trennflächen zwischen den drei
25 einzelnen Teilen der Sonde sind mit x_1 , x_2 und x_3 bezeichnet, der abgestufte Übergang von dem Teil der Sonde mit verringertem Durchmesser gegenüber dem verbleibenden Teil des Wandlers liegt bei 0, und der projizierte Winkel der kegel-
30 stumpfförmigen Spitze liegt bei x_4 .

Die Zeit-unabhängige Gleichung für die Fort-

pflanzung von Longitudinalwellen in einem festen Medium bei einer einzigen Frequenz f ist

$$\frac{d}{dx} \left(A(x) \frac{d\eta_i}{dx} \right) + k^2 A(x) \eta_i = 0, \quad (1)$$

- 5 wobei η_i die Verschiebung gegenüber dem Gleichgewicht (äquivalent zur Schwingungsamplitude) in dem i -ten Bereich ($i = 0, 1, 2$) als Funktion der Position x ist. $A_i(x)$ ist die Querschnittsfläche in jedem Bereich, wiederum als Funktion von x , und
 10 k ist die Wellenzahl, bezogen auf die Frequenz der Welle f und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Schalls im Medium mit der Formel $k=2\pi f/c$.

Gleichung 1 gilt unter den Bedingungen von

- 15 a) es ist nur eine einzige Frequenz einer sinusförmigen Schwingung vorhanden;
 b) die Querabmessungen sind für die ausgewählte Frequenz kleiner als eine Viertel-Wellenlänge; und
 20 c) elastische Linearität.

Diese Bedingungen sind im vorliegenden Fall erfüllt.

Für jede der drei Zonen wurden die Querschnitts-
 25 flächen $A_i(x)$ ermittelt zu

$$A_0(x) = \pi r_0^2 \quad 0 \leq x \leq x_1 \quad (2a)$$

$$A_1(x) = \pi r_1^2 \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (2b)$$

$$A_2(x) = \frac{\pi r_1^2 (x_4 - x)}{(x_4 - x_2)^2} \quad x_2 \leq x \leq x_3. \quad (2c)$$

Die diesen drei Zonen zugeordneten Wellengleichungen sind gegeben durch

$$\frac{d^2 \eta_0}{dx^2} + k^2 \eta_0 = 0 \quad 0 \leq x \leq x_1 \quad (3a)$$

$$\frac{d^2 \eta_1}{dx^2} + k^2 \eta_1 = 0 \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (3b)$$

$$\frac{d^2 \eta_2}{du^2} + \frac{2}{u} \frac{d\eta_2}{du} + \eta_2 = 0; \quad x_2 \leq x \leq x_3 \quad (3c)$$

10

$$u \equiv k(x - x_4)$$

In den Zonen 0 und 1, in denen die Querschnittsflächen nicht eine Funktion von x sind, kann der
 15 Flächenausdruck aus der Wellengleichung gestrichen werden. In der Zone 2 ist die Querschnittsfläche variabel, und somit nimmt die Wellengleichung eine wesentlich andere Form an. Obgleich der Kegelwinkel nicht ausdrücklich in dem Ausdruck
 20 erscheint, gilt doch die Auswahl des Wertes für x_4 diesen Parameter unverwechselbar.

Analytische Lösungen für alle Differentialgleichungen zweiter Ordnung der Gleichungen (3) sind
 25 möglich. Gleichungen (3a) und (3b) haben beide einfache harmonische Lösungen. Gleichung (3c) ist eine Normalform einer sphärischen Bessel'schen Funktion null-ter Ordnung, deren beide Lösungen J und Y , als sphärische Bessel-Funktion bekannt
 30 sind, für die null-te Ordnung gegeben sind durch

$$J_0 = \frac{\sin u}{u} ; \quad Y_0 = \frac{-\cos u}{u} .$$

Die Formen der drei Lösungen sind dabei wie
5 folgt:

$$\eta_0(x) = A_0 \cos kx + B_0 \sin kx \quad 0 \leq x \leq x_1 \quad (4a)$$

$$\eta_1(x) = A_1 \cos kx + B_1 \sin kx \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (4b)$$

$$10 \quad \eta_2(x) = \frac{A_2 \cos k(x - x_4) + B_2 \sin k(x - x_4)}{x - x_4} \quad x_2 \leq x \leq x_3, \quad (4c)$$

15 wobei die sechs Konstanten A_0, A_1, A_2, B_0, B_1
und B_2 bis jetzt unbekannt sind, wobei deren
Werte von der Art der Randbedingungen an den
Trennflächen zwischen den Zonen und an den Ab-
schnittsenden abhängt.

20

Die Randbedingungen lassen sich einfach wie folgt
angeben:

- i) an jeder Trennfläche zwischen den Zonen
($x = x_1, x_2$) muß die Amplitude der Welle
über der Trennfläche kontinuierlich sein
und die durch die Bewegung der longitudi-
nalen Welle erzeugten Spannungen müssen
ebenfalls kontinuierlich sein.
- ii) Bei der Amplitude $x = 0$ muß die Schwingungs-
amplitude Null sein, da dies eine Knoten-
punktsebene ist.
- 30 iii) Am Ende der Spitze ($x = x_3$) muß die Spannung
verschwinden, da die Ebene von x_3 ein
Schwingungsbauch ist.

Diese Randbedingungen können durch sechs einfache Gleichungen dargestellt werden:

$$\eta_0(0) = 0 \quad (\text{ii}) \quad (5a)$$

$$5 \quad \eta_0(x_1) = \eta_1(x_1) \quad (5b)$$

$$S_0 \eta'_0(x_1) = S_1 \eta'_1(x_1) \quad (5c)$$

(i)

$$\eta_1(x_2) = \eta_2(x_2) \quad (5d)$$

$$10 \quad \eta'_1(x_2) = \eta'_2(x_2) \quad (5e)$$

$$\eta'_2(x_3) = 0 \quad (\text{iii}) \quad (5f)$$

Aus diesen sechs Gleichungen und den Lösungen
 15 der Differentialgleichungen (Gleichungen 3) ist
 es möglich, die sechs unbekannten Konstanten
 (die A's und B's) aufzufinden. Diese Art der
 Berechnung hat immer noch etwas willkürliches
 an sich, da es lediglich möglich ist, die Ver-
 20 hältnisse jeder dieser Konstanten zu einer von
 ihnen zu bestimmen. Somit ist es notwendig, will-
 kürlich für eine der Konstanten einen Wert fest-
 zulegen, um die übrigen zu berechnen. Das macht
 jedoch keine praktischen Schwierigkeiten, da
 25 im vorliegenden Fall jedenfalls immer nur die
 relativen Amplituden von Interesse sind.

Vor der Berechnung dieser Konstanten müssen die
 die Werte von x_1 , x_2 , x_3 und x_4 (außerdem auch
 30 S_0 und S_1) festgelegt werden. Es muß jedoch in
 Bezug auf diese Analyse eine prinzipielle Anmerkung

gemacht werden, nämlich daß die Längenkoordinaten nicht voneinander unabhängig sind. Sie hängen vielmehr durch die Forderung zusammen, daß die Gesamtlänge gleich einer Viertel-Wellenlänge sein soll.

Löst man die sechs Gleichungen für die Randbedingungen (Gleichungen 5), indem man in jede dieser Gleichungen die entsprechende Form der Lösungen der Wellengleichungen (Gleichungen 3) substituiert, erhält man eine 6 x 6 Determinante, die zu Null gesetzt wird. Löst man diese Determinante, so erhält man einen langen algebraischen Ausdruck zwischen den vier Koordinaten. Die Form dieser Beziehung, die als charakteristische Gleichung bezeichnet wird, ist wie folgt:

$$\tan kx_1 = \frac{S_0}{S_1} \left(\frac{(k(af-be) \cos k(x_2-x_1) - (cf-ed))}{k(af-be) \sin k(x_2-x_1) + (cf-ed)} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{wobei } a &= \frac{-\cos k(x_2-x_4)}{x_2-x_4} ; b = \frac{-\sin k(x_2-x_4)}{x_2-x_4} \\ c &= \frac{k \sin k(x_2-x_4)}{x_2-x_4} + \frac{\cos k(x_2-x_4)}{(x_2-x_4)^2} \\ d &= \frac{-k \cos k(x_2-x_4)}{x_2-x_4} + \frac{\sin k(x_2-x_4)}{(x_2-x_4)^2} \\ e &= -(x_3-x_4) k \sin k(x_3-x_4) - \cos k(x_3-x_4) , \end{aligned}$$

$$f = (x_3 - x_4) k \cos k (x_3 - x_4) - \sin k (x_3 - x_4)$$

ist.

- 5 Wählt man willkürlich beliebige drei der vier Koordinaten aus, dann läßt sich ein einziger Wert für die vierte Koordinate durch Lösung der charakteristischen Gleichung berechnen. Wie nunmehr zu erkennen ist, ergibt sich, daß logi-
- 10 scherweise x_1 die zu berechnende Koordinate ist, nachdem Werte für $x_2 - x_1$, $x_3 - x_2$ und $x_4 - x_3$ und die Zylinderquerschnittsflächen angenommen wurden. Es wird darauf hingewiesen, daß die tatsächlichen Mengen $x_2 - x_1$ usw. hier angegeben sind
- 15 und nicht die Koordinaten selbst. Diese Größen sind funktional äquivalent in der Auswertung der charakteristischen Gleichung und führen zu einer beträchtlichen Vereinfachung.
- 20 Die folgenden Erfordernisse müssen bei der Auswahl geeigneter Werte für die obengenannten Abmessungen berücksichtigt werden:
- a) die Masse der mit einem Flansch versehenen
- 25 Spitze muß klein genug sein, um eine übermäßige Belastung des gesamten Zerstäubers zu vermeiden;
- b) die kegelförmige Fläche muß groß genug sein, damit für die beabsichtigten Strömungsgeschwindigkeiten eine ausreichende Zerstäuber-
- 30 fläche vorhanden ist,

- c) der Kegelwinkel muß entsprechend dem gewünschten Öffnungswinkel des zerstäubten Strahls gewählt werden;
- d) am Fuß des Kegels sollte ein zylindrischer
 5 Abschnitt vorgesehen und sollte so dick gewählt sein, daß sichergestellt ist, daß die gesamte Spitze als starrer Körper vibriert, und
- e) die Spitze muß notwendigerweise kegelstumpfförmig sein, damit eine kleine ebene Fläche
 10 rund um die Austrittsöffnung der Bohrung gebildet ist.

Die sich widersprechenden Forderungen der Starrheit und der geringen Masse bestimmen die optimale
 15 Länge der zylindrischen Basis des Kegels $x_2 - x_1$. Der gewünschte Öffnungswinkel legt den Kegelöffnungswinkel fest und die Größe der Bohrung bestimmt den Durchmesser x_3 . Der Durchmesser von x_2 wird dann so bestimmt, daß die erforderliche
 20 Zerstäubungsoberfläche entsteht. Der Öffnungswinkel und die Durchmesser x_2 , x_3 legen dann die Abstände $x_3 - x_2$ und $x_4 - x_3$ fest. Damit verbleibt die Länge x_1 des Abschnitts 0 mit verringertem Durchmesser als einzige unbekannte Abmessung.
 25 Der Wert von x_1 wird aus der oben beschriebenen charakteristischen Gleichung berechnet, die nunmehr die Form annimmt

$$x_1 = \tan^{-1} g(x_2 - x_1; x_3 - x_2; x_4 - x_3; A_0/A_1; k) \quad (6)$$

30

wobei g der algebraische Ausdruck mit den trigonometrischen Funktionen der Parameter ist.

Beispiel:

Ein Ultraschallzerstäuber wurde für eine Betriebsfrequenz von 85 kHz entworfen, wobei die vorderen und rückwärtigen Abschnitte aus Aluminium bestanden, die piezoelektrischen Scheiben bestanden aus Bleizirkontitanat und die Scheibenelektrode aus Hartkupfer. Da die Longitudinalgeschwindigkeit von Schallwellen in Aluminium etwa $5,13 \times 10^5$ cm/sec beträgt, ist eine Viertelwellenlänge bei der Betriebsfrequenz etwa 1,51 cm.

Um sicherzustellen, daß der Wandler nur als Longitudinalschwinger arbeitet, sollten die Querschnittsabmessungen der Elemente kleiner sein als eine Viertel-Wellenlänge. Da der Verstärkungsfaktor der Sonde gleich dem Verhältnis der Querschnittsflächen des Wandlerkörpers und der Sonde ist, sollte der Durchmesser der Sonde so klein als möglich sein, so daß eine ausreichend hohe Schwingungsamplitude erzielt wird, die den für die Zerstäubung der zu zerstäubenden Flüssigkeit erforderlichen Schwellenwert überschreitet. Andererseits ist der kleinste Durchmesser der Sonde dadurch begrenzt, daß für die Brennstoffzufuhr eine Bohrung vorgesehen sein muß, und daß trotzdem die Sonde immer noch ausreichend starr und steif sein muß, eine mit einem starren Flansch versehene Spitze zu tragen, die die erforderliche Zerstäubungsoberfläche aufweist und trotzdem eine Schwingung nach Art einer einseitig eingespannten Feder vermeidet.

Unter Beachtung dieser Überlegungen wurden für ein Verstärkungsverhältnis von etwa 8 folgende Abmessungen ausgewählt:

- 5 piezoelektrische Scheiben
 \varnothing 1,27 cm u. 0,25 cm dick
 Wandlerkörper
 \varnothing 1,27 cm
 Sonde \varnothing 0,46 cm
- 10 mit Flansch versehene Spitze
 \varnothing 0,7 cm an der Basis.

- Für den gewünschten Öffnungswinkel für den zerstäubten Brennstoff von 60° wurde der entsprechende Öffnungswinkel für die kegelförmige Zerstäubungsoberfläche mit 120° gewählt. Die Länge der zylinderförmigen Basis des kegelförmigen Flansches ($x_2 - x_1$) sollte dabei etwa 0,05 cm sein, um sicherzustellen, daß der Flansch mit dem
- 20 starren Körper vibriert. Somit ergeben sich aus einfachen geometrischen Überlegungen die gesamte axiale Länge der kegelförmigen Oberfläche für die Spitze der Sonde ($x_4 - x_2$) zu etwa 0,20 cm. Die tatsächliche Oberfläche ist kegelstumpfförmig
 - 25 mit einem Durchmesser der Stirnfläche von etwa 0,21 cm. Somit wird $x_4 - x_3 = 0,06$ cm. Dadurch wird die axiale Länge der kegelstumpfförmigen Fläche ($x_3 - x_2$) auf etwa 0,14 cm verringert.
 - 30 Es sei noch einmal daran erinnert, daß die vorbestimmten Werte für die Parameter der charakteristischen Gleichung waren:

$$\begin{aligned}
 x_2 - x_1 &= 0,051 \text{ cm} \\
 x_3 - x_2 &= 0,137 \text{ cm} \\
 x_4 - x_3 &= 0,066 \text{ cm} \\
 S_0/S_1 &= 0,428 \\
 5 \quad k &= 1,050 \text{ cm}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Dies ergibt

$$x_1 = 1,230 \text{ cm.}$$

- 10 Mit einem mit diesen Abmessungen des oben erwähnten Beispiels aufgebauten Zerstäuber durchgeführte Versuche ergaben einen Strahl mit brauchbarer Stabilität, bei dem die Flüssigkeit fast von der ganzen Fläche unter einem
- 15 Winkel von etwa 30° in Bezug auf die Wandlerachse (d.h. 60° Öffnungswinkel des Strahls, angedeutet durch die Pfeile X und Y in Fig. 2) zerstäubt wurde. Zusätzlich zur Erzeugung des gewünschten Öffnungswinkels des Strahls wurde durch die kegelstumpfförmige Zerstäuberoberfläche der Grad wesentlich
- 20 reduziert, in dem die zerstäubten Tröpfchen anschließend wieder zusammenfließen, verglichen mit dem durch eine flache Zerstäubungsoberfläche abgegebenen Strahl, wodurch sich eine außergewöhnlich gleichmäßige Tröpfchenverteilung ergab.
- 25 Als dieser Versuchszerstäuber in einem handelsüblichen Ölbrenner im Austausch für einen normalen, mit Hochdruckdüse arbeitenden Zerstäuber eingebaut wurde, erzeugte er eine sehr gute selbsttragende
- 30 Flamme mit einem Aussehen, das der Flamme der ursprünglich eingesetzten Düse weitgehend glich.

Die mit einem gemäß der oben angegebenen rigo-
rosen analytischen Lösung berechneten Zerstäuber
erzielten Ergebnisse unterschieden sich ganz
deutlich von den zuvor beschriebenen Versuchser-
5 gebnissen mit einem Zerstäuber, dessen verstärkende
Spitze mit der für die Verwendung der Gleichung
für eine Spitze mit zylindrischem Flansch erfor-
derliche vereinfachende Annahme entworfen worden
war. Dieser Unterschied in den Ergebnissen ist
10 außerordentlich überraschend, da der Unterschied
in der gesamten Länge der Sonde plus Spitze
zwischen der angenäherten und der theoretisch
exakten Lösung nur etwa 10 Prozent betrug. Dies
zeigt, daß die Längsabmessungen des Verstärker-
15 teils des mit einer kegelförmigen Spitze versehe-
nen Ultraschallzerstäubers gemäß der Erfindung
außerordentlich kritisch sind.

Zur Vervollständigung der Analyse ist es erwünscht,
20 die Koeffizienten A_i und B_i der Lösungen gemäß
Gleichungen (3) zu berechnen. Diese sind für die
Ermittlung weiterer Informationen bezüglich der
Abmessungen nicht erforderlich, sind jedoch für
die Ermittlung des Wirkungsgrads der Konstruktion
25 des gesamten Verstärkerabschnitts nützlich.
Wie bereits erläutert, kann man Absolutwerte für
diese Koeffizienten nur dann erhalten, wenn einem
dieser Koeffizienten ein willkürlich gewählter
Wert gegeben wird. Dies ist in einem System von
30 Gleichungen wie dem hier vorliegenden normal,
wo die Lösungen solche sind, die nicht erzwungenen
Schwingungen entsprechen, d.h. wo keine äußere

anregende Kraft im Spitzenabschnitt zur Einwirkung kommt.

Es ist nur natürlich, für einen der Koeffizienten
 5 der Lösung für die Zone 0 (Gleichung 4a) einen willkürlichen Wert anzusetzen, da diese Zone des Verstärkerabschnitts den Doppelausgleichsabschnitt an die Düse ankoppelt. Für $A_0 = 0$ als Ergebnis der Randbedingung der Gleichung (5a)
 10 wurde $B_0 = 1$ als willkürlicher Wert gewählt. Die vier verbleibenden Koeffizienten wurden dann dadurch berechnet, daß man die Gleichung (4) für die Beziehungen für die Randbedingungen gemäß Gleichung (5) einsetzte und die sich ergebenden
 15 simultanen Gleichungen löste. Für das gegebene System sind die Ergebnisse

$$\begin{aligned} A_1 &= 0.150938961 \\ B_1 &= 0.956888663 \\ 20 \quad A_2 &= 0.000039163 \\ B_2 &= 0.364829648. \end{aligned}$$

In Fig. 3 ist ein Diagramm der relativen Verschiebung gegenüber der Position längs des Verstärkerabschnitts dargestellt. Die relative
 25 Amplitude ist als das Verhältnis der tatsächlichen Amplitude zu der Amplitude definiert, die an jedem Punkt auftreten würde, wenn der Verstärkerabschnitt ein gleichförmiger Zylinder
 30 mit einer Querschnittsfläche von r_0^2 mit der Länge einer Viertel-Wellenlänge wäre. Es sei darauf hingewiesen, daß die Spitze eine Amplitudenverringern von nur etwa 3 Prozent bewirkt.

Patentansprüche:

1. Ultraschallzerstäuber mit einem Treiber,
dessen Ausgangsebene eine longitudinale
Verschiebung einer vorbestimmten, im Ultra-
schallbereich liegenden Betriebsfrequenz
5 liefert, mit einem Schwingungsverstärker
in Form eines abgestuften Ultraschall-
schwingers, bestehend aus einem ersten
Zylinderabschnitt (34), dessen eingangsseitige
Ebene mit der Ausgangsebene des Treibers (33)
10 zusammenfällt, wobei die Länge des ersten
zylindrischen Abschnitts (34) einer Viertel-
Längenwelle der Betriebsfrequenz entspricht,
mit einem an den ersten zylindrischen Ab-
schnitt anschließenden zweiten zylindrischen
15 Abschnitt (35) mit wesentlich geringerem
Durchmesser als der erste zylindrische Ab-
schnitt (34), und mit einer am äußeren Ende
des zweiten zylindrischen Abschnitts liegenden,
mit einem Flansch versehenen Spitze (36),
20 dessen Durchmesser größer ist als der Durch-
messer des zweiten, aber kleiner als der
Durchmesser des ersten zylindrischen Abschnitts,
wobei die Stirnfläche der mit einem Flansch
versehenen Spitze eine Zerstäubungsoberfläche
25 bildet, sowie mit Mitteln (27, 28) zum Zu-
führen einer zu zerstäubenden Flüssigkeit nach
der Zerstäubungsoberfläche für eine Zerstäu-
bung mittels den durch den Treiber erzeugten
Schwingungen,
30 dadurch gekennzeichnet,
daß die Zerstäubungsoberfläche (29) konvex
kegelförmig ausgebildet ist, wobei die Achse

dieses Kegels parallel zur Richtung der Longitudinalschwingung verläuft, und daß der Öffnungswinkel des Kegels den Ergänzungswinkel zu dem ausgewählten Öffnungswinkel
5 des Kegels der zerstäubten Flüssigkeit bildet.

2. Ultraschallzerstäuber nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
10 daß für die Zufuhr der zu zerstäubenden Flüssigkeit an die Zerstäubungsoberfläche eine sich durch die zylindrischen Abschnitte und die mit Flansch versehene Spitze axial erstreckende Bohrung (28) vorgesehen ist, deren Öffnung
15 in der Mitte der Zerstäubungsoberfläche liegt.

3. Ultraschallzerstäuber nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet,
daß die Zerstäubungsoberfläche (29) kegelförmig gestaltet ist.
20

4. Ultraschallzerstäuber nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet,
daß die mit einem Flansch versehene Spitze
25 einen an die Grundfläche des kegelförmigen Zerstäubungsoberfläche anschließenden kurzen zylinderförmigen Abschnitt (38) gleichen Durchmessers umfaßt, der sicherstellt, daß die Zerstäubungsoberfläche nur Longitudinal-
30 schwingungen ausführt.

5. Ultraschallzerstäuber nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
daß der erste zylindrische Abschnitt (34)
des Schwingungsverstärkers die Länge A,
5 der zweite Abschnitt (35) die Länge B und
die mit Flansch versehene Spitze (36) die
axiale Länge C aufweist und daß die Summe
(B + C) kleiner ist als A.
- 10 6. Ultraschallzerstäuber nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet,
daß die axialen Längen der beiden zylind-
rischen Abschnitte (34, 35) und des kegel-
stumpfförmigen Abschnitts der mit einem
15 Flansch versehenen Spitze (36) gemäß den
folgenden Gleichungen zueinander in Bezie-
hung stehen:

$$\tan kx_1 =$$

$$20 \quad \frac{S_0}{S_1} \left(\frac{k(af-be)\cos k(x_2-x_1) - (cf-ed)\sin k(x_2-x_1)}{k(af-be)\sin k(x_2-x_1) + (cf-ed)\cos k(x_2-x_1)} \right)$$

$$\text{wobei } a = \frac{-\cos k(x_2-x_4)}{x_2-x_4};$$

$$25 \quad b = \frac{-\sin k(x_2-x_4)}{x_2-x_4}$$

$$c = \frac{k \sin k(x_2-x_4)}{x_2-x_4} + \frac{\cos k(x_2-x_4)}{(x_2-x_4)^2}$$

- 4 -

$$d = \frac{-k \cos k(x_2 - x_4)}{x_2 - x_4} + \frac{\sin k(x_2 - x_4)}{(x_2 - x_4)^2}$$

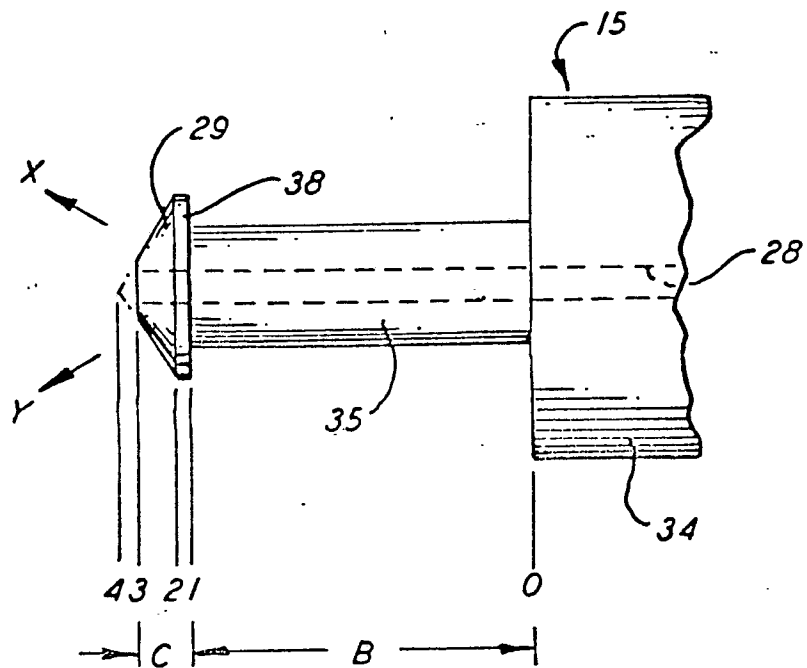
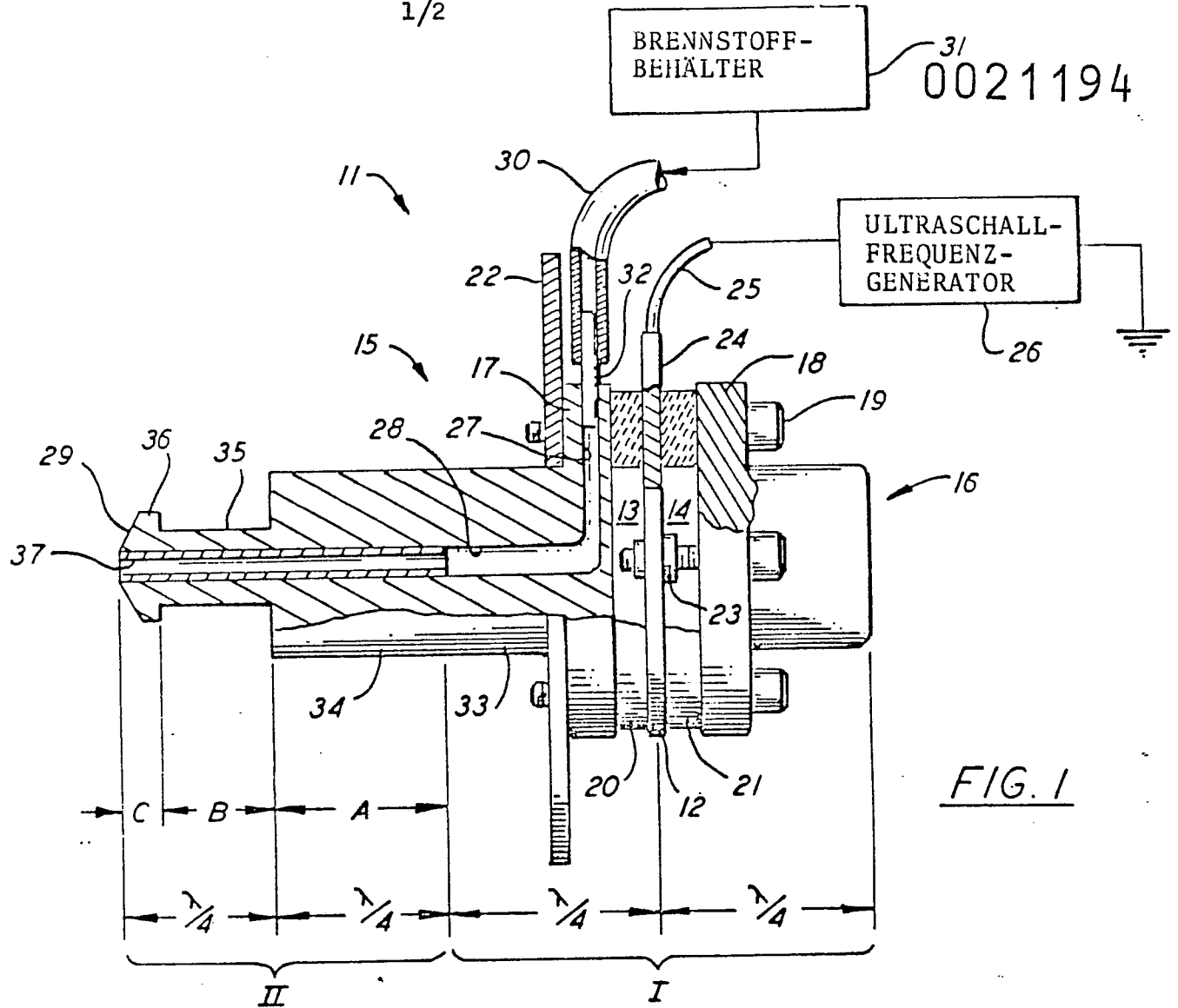
$$e = -(x_3 - x_4)k \sin k(x_3 - x_4) - \cos k(x_3 - x_4)$$

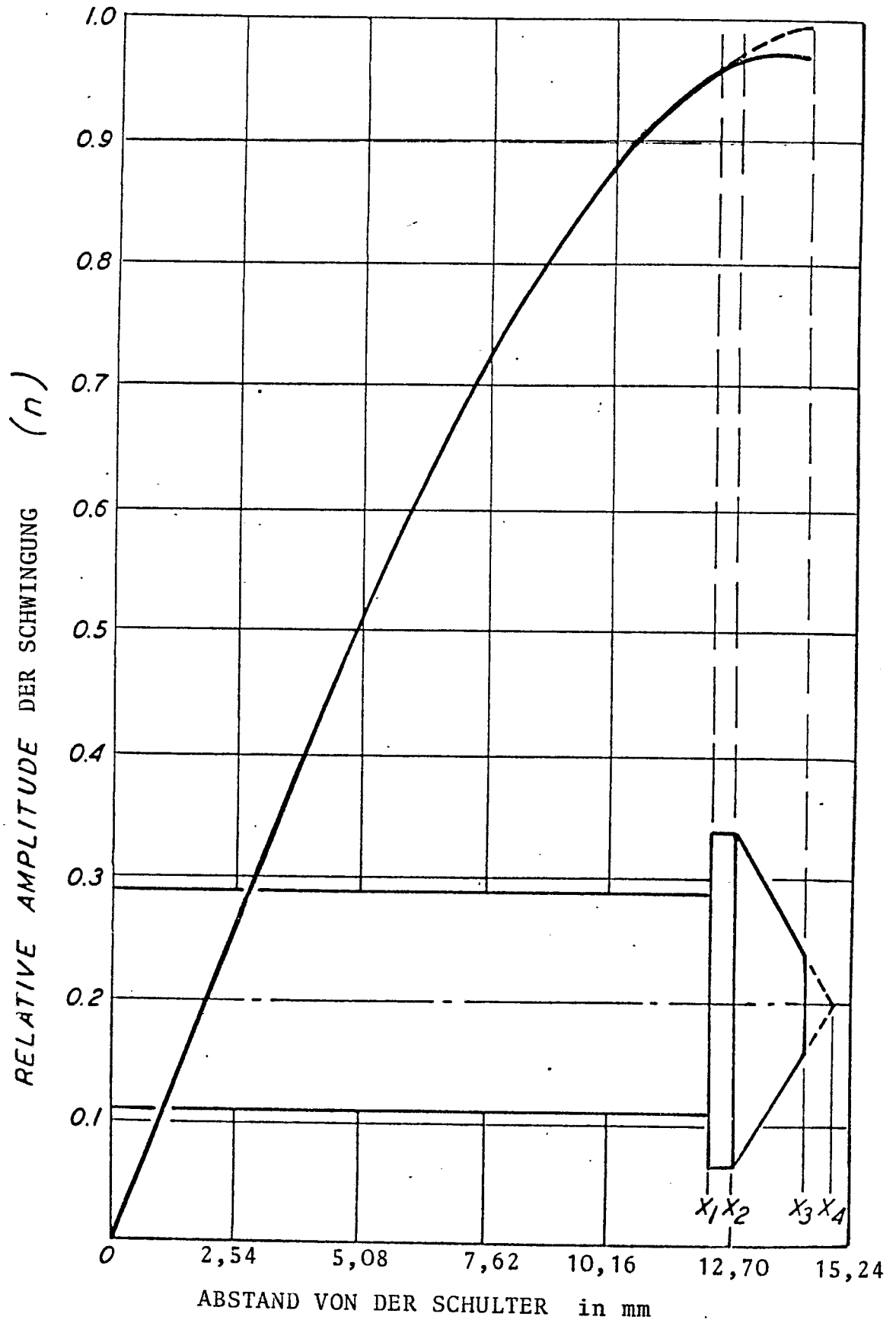
$$5 \quad f = (x_3 - x_4)k \cos k(x_3 - x_4) - \sin k(x_3 - x_4)$$

und x_1 die axiale Länge des zweiten zylindrischen Abschnitts (35), $x_2 - x_1$ die Länge des zylindrischen Abschnitts (38), $x_2 - x_3$ die Länge des kegelstumpfförmigen Abschnitts der mit einem Flansch versehenen Spitze, $x_3 - x_4$ der axiale Abstand vom äußeren Ende des kegelstumpfförmigen Abschnitts bis zur Spitze des die kegelstumpfförmige Oberfläche der Spitze enthaltenden Kegels, S_0 die Querschnittsfläche des zweiten zylindrischen Abschnitts und S_1 die Querschnittsfläche des zylindrischen Abschnitts der mit einem Flansch versehenen Spitze ist.

BRENNSTOFF-
BEHÄLTER

0021194



FIG. 3