

Prom. Nr. 2499

Erzeugung von Ultraschall mit Ferriten

VON DER

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR ERLANGUNG DER

WÜRDE EINES DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE

PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

Ulrich Enz

von Zürich und Eglisau

Referent: Herr Prof. E. Baumann

Korreferent: Herr Prof. W. Furrer



Zürich 1955

Dissertationsdruckerei Leemann AG

Vorwort

Der Zweck der vorliegenden Arbeit besteht darin, abzuklären ob es möglich ist, mit Ferriten Ultraschall zu erzeugen. Dabei soll im speziellen untersucht werden, wie groß die erreichbare Intensität und der Wirkungsgrad der Übertragung von elektrischer Energie in Schallenergie sind. Da vor allem der Vergleich mit den andern bekannten Methoden zur Ultraschallerzeugung von Interesse ist, werden auch einige Versuche mit diesen gemacht, vor allem mit dem elektrostriktiven Material Bariumtitanat. Ferner soll untersucht werden, ob sich Ultraschallschwinger aus Ferriten für gewisse technische Anwendungen des Ultraschalles eignen.

I. Einleitung

1. Überblick über die bekannten Methoden zur Erzeugung von Ultraschall

Unter Ultraschall versteht man elastische Schwingungen in festen, flüssigen oder gasförmigen Medien, wobei die Schallfrequenzen oberhalb der Hörgrenze, also oberhalb rund 20 kHz liegen. Die obere Frequenzgrenze, die experimentell erreicht wurde, liegt in der Größenordnung von 5×10^5 kHz. Bereits vor rund 50 Jahren wurden erstmals Ultraschallschwingungen erzeugt und nachgewiesen, und zwar durch *König* [1] *) mittels besonderen kleinen Stimmgabeln. Die auf diese Weise in Luft erzeugten Intensitäten sind äußerst schwach und die Schwingungen sind stark gedämpft.

Etwas größere Intensitäten und vor allem ungedämpfte Schwingungen lassen sich in Luft mit der von *Edelmann* [2] gebauten Galtonpfeife erreichen. Die Galtonpfeife ist eine gedeckte Lippenpfeife, die mit Preßluft betrieben wird. Die Tonhöhe wird durch die Größe des Resonanzraumes bestimmt.

Größere Intensitäten lassen sich mit dem Gasstrom-Schwinggenerator von *Hartmann* [3] erreichen. Zum Betrieb dieses Generators wird ein Luftstrom, der mit Ultraschallgeschwindigkeit aus einer Düse austritt, benötigt. In neuester Zeit wird eine verbesserte Hartmannsche Pfeife von *K. Brückmann* [4] be-

*) Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis am Schluß der Arbeit.

schrieben, mit der sich beachtliche Intensitäten erreichen lassen. Sie hat gegenüber der alten Ausführung ferner noch den Vorteil, den Ultraschall in einer festen Richtung abzustrahlen.

Eine Übertragung der Galtonpfeife auf Flüssigkeiten ist *Janovski* und *Pohlmann* [5] gelungen. Diese sogenannte Flüssigkeitspfeife hat erhebliche praktische Bedeutung erlangt bei der Herstellung von Emulsionen. Sie erzeugt relativ große Schallintensitäten bei Frequenzen bis ca. 30 kHz.

Eine weitere Erzeugungsmöglichkeit von Ultraschallwellen großer Intensität in Luft sind Ultraschallsirenen. *Porter* [6] beschreibt eine Hochleistungssirene, die eine akustische Leistung von 35 kW erreicht.

Der Vollständigkeit halber seien noch einige weitere Methoden angegeben: so der thermische und der elektrodynamische Ultraschallgeber.

Im folgenden möchte ich nun die bekannten modernen Methoden zur Erzeugung von Ultraschall behandeln. Diese zeichnen sich dadurch aus, daß die Leistung durchwegs aus einem Röhrengenerator stammt. Ferner lassen sich große Intensitäten nur in Flüssigkeiten erreichen. Es handelt sich also durchwegs um elektroakustische Übertrager, die elektrische Energie in akustische Energie in Flüssigkeiten übertragen. In jedem Falle wird ein fundamentaler Effekt verwendet, die Magnetostriktion bei Nickel und den magnetostriktiven Legierungen, der inverse piezoelektrische Effekt bei Quarz und vielen andern Kristallen wie Turmalin, Zinkblende usw. und schließlich die Elektrostriktion bei dem ferroelektrischen Bariumtitanat und den verwandten Verbindungen. Die erreichbaren Intensitäten in Flüssigkeiten liegen bei diesen drei Wandlerarten durchwegs bedeutend höher als bei andern Methoden. Für die praktische Anwendung entscheidet der Wirkungsgrad der Energieumwandlung sowie die Einfachheit und Betriebssicherheit der Anordnung, welcher Wandlerart der Vorzug gegeben werden soll. Jede dieser Methoden hat bestimmte Anwendungsmöglichkeiten und gewisse Vor- und Nachteile. Diese sollen im folgenden Abschnitt besprochen werden.

2. Vor- und Nachteile der bekannten Wandlerarten

a) Magnetostriktive Schwinger bestehen aus dünnwandigen Rohren oder aus lamellierten Kernen, die aus dünnen Blechen aufgebaut sind. Als Werkstoff findet Rein-Nickel, Ceras Permendur (*Camp* [7]) und Aluminium-Eisen-Legierungen [8] Verwendung. Durch die Lamellierung werden die Möglichkeiten der Formgebung stark eingeschränkt. Die Schwinger sind nur bis ca. 100 kHz mit genügend großem Wirkungsgrad verwendbar, da bei höheren Frequenzen die Verluste enorm ansteigen und die Lamellierung nicht beliebig weit getrieben werden kann. Auch bei tieferen Frequenzen, z. B. 20 kHz, sind die Wirbelstromverluste so hoch, daß bei Dauerbetrieb nicht ohne Wasserkühlung gearbeitet werden kann. Ein Vorteil aller magnetostriktiver Schallgeber ist deren

niedrige elektrische Impedanz; dadurch können die Arbeitsspannungen niedrig gehalten werden.

b) Der Vorteil der piezoelektrischen Schwinger aus Quarz liegt in der hohen Festigkeit und der geringen inneren mechanischen Dämpfung des Quarzkristalles. Daher lassen sich mit Quarzschallgebern hohe Intensitäten erreichen. Die Spannung, die für eine bestimmte abgestrahlte Schallintensität erforderlich ist, verhält sich umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenz. So beträgt die Spannung für eine eher kleine Intensität von $5 \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^3}$ bei 300 kHz bereits 8000 Volt. Die sich aus diesen hohen Spannungen ergebenden Isolationschwierigkeiten lassen sich bei Frequenzen unterhalb 300 kHz nur mit großer Mühe beherrschen. Die übrigen piezoelektrischen Materialien wie Seignettesalz, Ammoniumphosphat usw. haben eine kleinere mechanische Festigkeit oder sind nicht beständig gegen äußere Einflüsse wie Temperatur und Feuchtigkeit und eignen sich daher wenig für die Erzeugung von Leistungultraschall.

c) Die ferroelektrischen Keramiken wie z. B. Bariumtitanat lassen sich bei hohen und tiefen Frequenzen verwenden. Die erreichbaren Schallintensitäten sind von der Größenordnung des Quarzes, wobei die Betriebsspannungen um einen Faktor 200—300 kleiner sind. Ein Nachteil dieser Keramik besteht in ihrem tiefen Curiepunkt (ca. 130° C), der ohne ausreichende Kühlung infolge der hohen dielektrischen Verluste bald erreicht wird, wobei die elektrostriktiven Eigenschaften verschwinden. Ferner hat Bariumtitanat die Neigung Wasser aufzunehmen, wodurch die Leitfähigkeit und damit die Verluste ansteigen. Daher muß es gleich wie Quarz in Öl betrieben werden. Auf alle Fälle ist Bariumtitanat eine moderne und zweckmäßige Methode zur Erzeugung von Ultraschall. Durch günstige Formgebung (hohlspiegelförmig), die bei einem keramischen Material leicht zu erreichen ist, lassen sich die Ultraschallwellen auf eine kleine Zone konzentrieren, in der dann sehr große Intensitäten erreicht werden können. Von der sehr umfangreichen Literatur über die Herstellung und Anwendung von Bariumtitanat-Keramik erwähne ich *Slyh and Bixby* [9], *Roberts* [10], *Mason and Wick* [11], *W. R. Eubank* [12] und *D. A. Berlincourt* [13].

3. Verwendung von Ferriten zur Ultraschallerzeugung

Es ist offensichtlich, daß ein gewisses Interesse dafür besteht, abzuklären ob es möglich ist, Ultraschall großer Intensität zu erzeugen, ohne die verschiedenen beschriebenen Nachteile in Kauf zu nehmen. Die Möglichkeit ist bei den Ferriten gegeben. Daher wurde die Anwendbarkeit der Ferrite für die magnetostriktive Erzeugung von Ultraschall eingehend untersucht.

Bei den Ferriten fallen die Wirbelstromverluste weg, da deren elektrische Leitfähigkeit praktisch verschwindend klein ist. Aus diesem Grund sind die Ferrite auch als Kernmaterial für Hochfrequenztransformatoren ent-

wickelt worden. Die Sättigungsmagnetisierung gewisser Ferrite ist in der Größenordnung derjenigen von Nickel; Anfangspermeabilität und Magnetostriktion lassen sich durch geeignete Zusammensetzung in weitem Maß verändern.

Die grundlegende Arbeit über die Verwendung von Ferriten als magnetostriktive Resonatoren stammt von *Diethelm* [14], welcher sich jedoch auf deren Anwendung in elektromechanischen Filtern beschränkt.

Die Versuche haben gezeigt, daß gewisse Ferrite sich zur Ultraschallerzeugung gut eignen. In elektrischer und magnetischer Hinsicht ist dabei ein Optimum erreichbar; dagegen ist die totale, mit einem bestimmten Ferrit-schwinger in Schall umsetzbare Leistung, d. h. die erzielbare Schallintensität beschränkt, da die mechanische Festigkeit der Ferrit-Keramik die auftretenden hohen Zugspannungen nicht erträgt. Immerhin sind die erreichbaren Intensitäten größer als bei Nickelschwingern, ferner ist der Wirkungsgrad der Ferritschwinger größer. Ferner sind diese in hohem Maße beständig gegenüber Einflüssen wie erhöhte Temperatur (Curiepunkt je nach Zusammensetzung zwischen 100 und 550°C) und chemische Aggression. Die Ferrite sind beständig gegen Säure, Laugen und Lösungsmittel und können direkt in diesen Flüssigkeiten betrieben werden.

Im folgenden wird abgeklärt, welche optimale chemische Zusammensetzung die Ferrite zur Erreichung des höchsten Wirkungsgrades haben müssen, ferner welche Formen der Schwinger am günstigsten sind und weiter wie groß die zulässige Belastbarkeit des Materials ist.

4. Überblick über die Anwendungen des Ultraschalles

Die Anzahl der vorgeschlagenen Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschalles in Wissenschaft und Technik ist bereits auf eine schwer überblickbare Größe angestiegen. Dagegen ist die Zahl der technisch realisierten Anwendungen immer noch beschränkt, nicht zuletzt auch deshalb, weil zum Teil betriebssichere und einfache Lösungen zur Erzeugung des Ultraschalles fehlen. Eine Unterscheidung in bezug auf die Anwendungen läßt sich folgendermaßen machen:

- a) Anwendungen, bei denen die Ausbreitung von Wellen eine Rolle spielt, und
- b) Anwendungen, bei denen die Einwirkung von Ultraschallenergie eine Rolle spielt.

Zur ersten Kategorie gehören Messung der Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten, Gasen und festen Körpern, Messung der Elastizitätskonstante in festen Stoffen. Als technische Anwendung gehört dazu die Echolotung und die verschiedenen Materialprüfungsverfahren, ferner eine Anzahl weiterer Möglichkeiten wie Ultraschall-Verzögerungsstrecken usw. Viele dieser Anwendun-

gen haben in den betreffenden Gebieten bereits festen Fuß gefaßt und sind daraus nicht mehr wegzudenken. Anders liegt die Sache bei den energetischen Anwendungen des Ultraschalles, wo gesicherte Anwendungen mit Ausnahme des Ultraschalles in der Medizin noch eher selten sind. Jedoch sind gerade hier gute Aussichten vorhanden. Ich erwähne die chemischen Wirkungen des Ultraschalles wie Polymerisationen, Herstellung von Emulsionen und Dispersionen von festen Stoffen und Flüssigkeiten, thermische Wirkungen, Entgasung von Flüssigkeiten und Schmelzen. Diese Anwendungen sind dargestellt in *Bergmann*[15]. In neuerer Zeit sind noch andere Verwertungsmöglichkeiten des Ultraschalles bekannt geworden, so die Reinigung von kleinen Formstücken und das Bohren von Vertiefungen und Löchern in sehr harte Materialien. Diese beiden Anwendungen sind Gegenstand von Entwicklungen am Institut für technische Physik der ETH und ich komme am Schlusse dieser Arbeit ausführlicher darauf zurück.

II. Theoretischer Teil

I. Das Ersatzschema des magnetostruktiven Wandlers

Die einfachste Form eines zweckmäßigen Ultraschallgebers ist ein freischwingender Stab, der in der Mitte gelagert ist, wobei der magnetische Fluß durch ein Joch geschlossen wird. Der Stab wird in der Grundfrequenz ange-

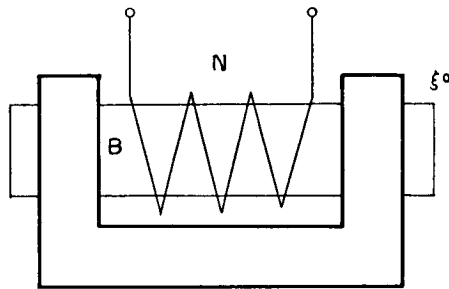


Fig. 1

regt; die Wellenlänge ist gleich $2l$, wenn l die Länge des Stabes ist. Eine solche Form (Fig. 1) hat übersichtliche mechanische und elektrische Eigenschaften und ist einer Berechnung zugänglich. Ferner ist sie dem Werkstoff Ferrit angepaßt. Die Vormagnetisierung erfolgt durch einen dem Hochfrequenzstrom überlagerten Gleichstrom.

Zur Herleitung der Eigenschaften dieses Wandlers bedient man sich mit Vorteil der Lagrangegleichungen. Darin werden als Lagekoordinaten elektrische und mechanische Größen verwendet. Man benötigt daher eine elektrisch-