

GESICHTSPUNKTE FÜR DIE OPTIMIERUNG VON ULTRASCHALL-TRANSFORMATOREN

J. Herbertz, K.-W. Hirsch

Ultraschalltechnik, Univ.-GH-Duisburg

1. Einleitung

Ultraschall-Schnelletransformatoren sollen die Anpassung eines US-Verbrauchers an einen US-Erzeuger bewirken. An diese Transformatoren wird die Forderung gestellt, möglichst hohe US-Leistungen ohne Verluste und ohne Überlastung des für den Transformator benutzten Werkstoffes am US-Verbraucher zur Verfügung zu stellen.

Die Optimierung setzt ein verlässliches Rechenverfahren voraus, das es gestattet, für beliebig konturierte Transformatoren die Übertragungseigenschaften numerisch zu berechnen. Genaue Messungen der Resonanzfrequenz an einigen technisch relevanten Transformator-Konturen haben gezeigt, daß die bisher verwendeten Lösungsmethoden zu ungenau sind und zur wahren Materialbelastung keine Aussage machen können. [1]

2. Finite Elemente

Für die Entwicklung eines Rechenverfahrens mit finiten Elementen benutzen wir als Grundlage die lineare eindimensionale Schwingungsgleichung. Diese Differentialgleichung darf nur auf einheitliche Volumenbereiche angewendet werden, in denen keine erhebliche Richtungsänderung der Kraft- und Schnellevektoren auftreten.

Die experimentell bestätigten Ungenauigkeiten der bisherigen Rechenmethoden lassen sich auf eine Verletzung dieser Bedingung zurückführen. Deshalb ist eine Segmentierung in hinreichend kleine finite Elemente von entscheidender Bedeutung.

2.1 Segmentierung in finite Elemente

Eine Aufteilung des Transformators in planparallele Scheiben senkrecht zu seiner Symmetrieachse wie in [2] erzeugt z.B. keine finiten Elemente, die den Anforderungen genügen.

Im folgenden soll am Beispiel des scharfkantig gestuften Zylinders, - einer Kontur, die den Unterschied zu bisherigen Rechenmethoden sehr deutlich macht, - eine Segmentierung mit Hilfe der konformen Abbildung beschrieben und deren Konsequenzen diskutiert werden.

Die konforme Abbildung eines Streifens auf ein Gebiet mit einer Stufe liefert Äquipotentiallinien, die durch Rotation um die Zylinderachse gekrümmte Phasenflächen ergeben. Da die Dicke der zwischen benachbarten Phasenflächen liegenden Scheiben ortsabhängig ist, wie Abb. 1 zeigt, ergibt erst eine Unterteilung der Scheibe in ringförmige Segmente finite Elemente, die bei genügend feiner Segmentierung als homogene Leitungsstücke betrachtet werden können. Durch Verkettung dieser Segmente mit Hilfe der Vierpolrechnung lassen sich dann Aussagen über den Transformator gewinnen.

Gegen die Berechnung der Phasenflächen mit Hilfe der konformen Abbildung lassen sich allerdings Einwände vorbringen:

Für das dreidimensionale, zylindersymmetrische Problem kann die zweidimensionale konforme Abbildung nur Nährlösungen liefern.

Das zeigt sich auch darin, daß für die planen Stirnflächen des Transformators nur gekrümmte Phasenflächen erhalten werden können.

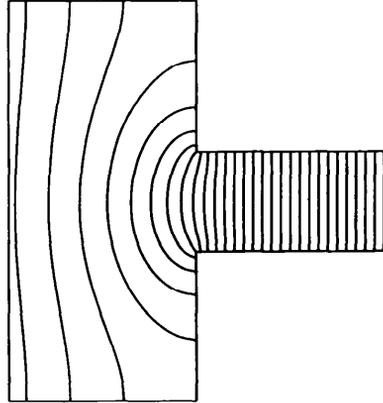


Abb.1
Phasenflächen in einem scharfkantig gestuften Transformator (konforme Abbildung)

2.2 Akustische Vierpolrechnung

Können die finiten Elemente als verlustfreie homogene Leitungstücke aufgefaßt werden, läßt sich deren Übertragungsverhalten durch das Gleichungssystem (1) beschreiben

$$\begin{pmatrix} K_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kl & jZ \sin kl \\ j/Z \sin kl & \cos kl \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

- K_0, K_1 Kraft auf Eingangs- bzw. Ausgangsseite
- v_0, v_1 Schnelle auf Eingangs- bzw. Ausgangsseite
- $Z = \rho cF$ Wellenwiderstand der homogenen Leitung
- l Länge des Leitungsstückes
- k Wellenzahl

Durch Parallelschaltung und Kettenschaltung der Matrizen der einzelnen finiten Elemente erhält man eine einzige Kettenmatrix, die das akustische Übertragungsverhalten des Transformators bei einer Frequenz vollständig beschreibt. [3]

Die Werte dieser Matrix bei der Resonanzfrequenz sind von besonderem Interesse. Bei der longitudinalen $\lambda/2$ -Resonanz nimmt die Kettenmatrix die in Gleichung (2) dargestellte Form an, aus der die wichtigen Kenngrößen leicht entnommen werden können.

$$\begin{pmatrix} K_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/\beta & 0 \\ j/\zeta & -\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \tag{2}$$

- β Transformationsverhältnis
- ζ Streuimpedanz

In Analogie zur elektrischen Vierpoltheorie bestimmt die Streuimpedanz ζ das Leistungs-dämpfungs-kennmaß g_k gemäß Gleichung (3) für einen Transformator, der mit seinem eigenen Wellenwiderstand Z_1 abgeschlossen ist.

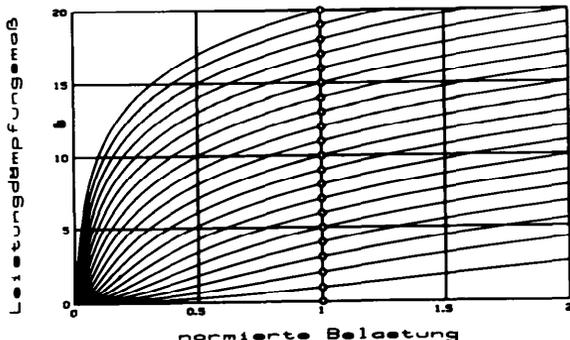
$$g_k = 5 \lg(1+(\beta Z_1/\zeta)^2) \quad \text{in dB} \tag{3}$$

Normiert man die Belastung auf den Wellenwiderstand Z_1 , so ergeben sich in Abhängigkeit von der so normierten Belastung die in Abb.2 dargestellten Leistungs-dämpfungen.

Abb.2

Abhängigkeit des Leistungsdämpfungsmaßes bei verschiedenen Leistungsdämpfungs-kennmaßen

(Die Belastung ist normiert auf den ausgangsseitigen Wellenwiderstand des Transformators.)



2.3 Ergebnisse an scharfkantig gestuften Transformatoren

Zur Überprüfung des Rechenverfahrens haben wir die konforme Abbildung und die akustische Vierpolrechnung auf scharfkantig gestufte Zylindertransformatoren mit verschiedenen Durchmesserhältnissen angewendet. Hierbei wurde die Wirkung der Querkontraktion bezüglich der diameterabhängigen Dispersion der Phasengeschwindigkeit noch nicht berücksichtigt.

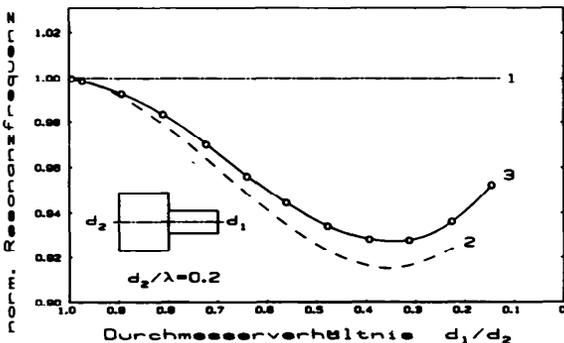
Abb.3 zeigt, daß das Rechenverfahren Werte für die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis liefert, die sehr viel näher an den experimentellen Ergebnissen liegen, als die Voraus-sagen, die auf der Annahme ebener Phasenflächen fußen.

Abb.4 zeigt, daß im Gegensatz zu [2] das Leistungsdämpfungs-kennmaß scharfkantig gestufter Transformatoren grundsätzlich von Null verschieden ist und für technisch interessante Fälle erhebliche Werte annimmt.

Abb.3

Abhängigkeit der Resonanzfrequenz vom Durchmesser Verhältnis

- 1 Rechnung mit ebenen Phasenflächen
- 2 Rechnung mit gekrümmten Phasenflächen
- 3 Meßergebnisse



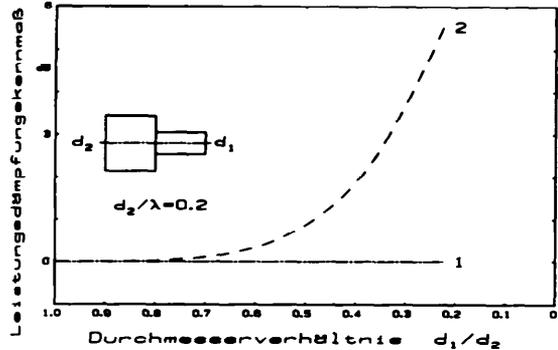


Abb. 4

Abhängigkeit des Leistungsdämpfungskennmaßes vom Durchmesserverhältnis

- 1 Rechnung mit ebenen Phasenflächen
- 2 Rechnung mit gekrümmten Phasenflächen

3. Optimierung von Schnelletransformatoren

Die Optimierung von Transformatoren für höchste Leistungen kann bei gegebenem Werkstoff nur über eine geeignete Wahl der Kontur erfolgen. Hierbei sind drei Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- a) Die Kontur muß ein Transformationsverhältnis aufweisen, daß eine Leistungsanpassung an den US-Erzeuger gegeben ist.
- b) Zur Vermeidung einer Leistungsdämpfung muß die Kontur eine möglichst hohe Streuimpedanz aufweisen.
- c) Die als "Figure of Merit" bezeichnete Größe soll einen möglichst hohen Wert annehmen. [4] Diese Kenngröße einer Kontur stellt das Verhältnis zwischen maximaler Dehnung an einem zylindrischen Vergleichsstab zu maximaler Dehnung am Transformator bei jeweils gleicher Schnelle dar und ist deshalb ein Maß für die mit einem Werkstoff mit gegebener Wechsellastfestigkeit maximal erzielbare Schnelle.

Bei der Berechnung von Transformatoren durch Segmentierung und Verkettung mit Hilfe der akustischen Vierpolrechnung ergeben sich gleichzeitig Informationen über den Ort, an dem die maximale Dehnung bei Berücksichtigung des Laufwellenanteils auftritt.

Wir erwarten, daß bei der Weiterentwicklung des beschriebenen Rechenverfahrens, z.B. durch den Ersatz der konformen Abbildung durch eine Konturtransformation [5], Aussagen gewonnen werden können, die sich einerseits deutlich von bisherigen Aussagen in der Literatur unterscheiden und die andererseits quantitative Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen zeigen.

4. Literatur

- [1] HERBERTZ, J.; HIRSCH, K.-W.: Fortschritte der Akustik, München 1980, VDE-Verlag Berlin, S. 519-522
- [2] BRINKMANN, R.: VDI-Z 113 (1971) 1, S. 27-32
- [3] POHLMAN, R.; HERBERTZ, J.: Forschungsberichte des Landes NW Nr. 2842, Westdeutscher Verlag Opladen 1979
- [4] EISNER, E.; HICKS, R.E.: 5^e Congrès International d'acoustique Liège September 1965, K 68
- [5] HERBERTZ, J.: Fortschritte der Akustik, Berlin 1981, VDE-Verlag Berlin

Diese Untersuchungen werden vom Minister für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.