

TRANSFORMATIONSVERHÄLTNIS UND RESONANZFREQUENZ VON ULTRASCHALLSCHNELLETRANSFORMATOREN

J. Herbertz, K.-W. Hirsch

Ultraschalltechnik, Univ. Duisburg

Einleitung

Für die Anwendung von Leistungs-Ultraschall ist die optimale Auslegung der schwingungsübertragenden Verbindung zwischen dem Ultraschall-Wandler und den verschiedenartigen Werkzeugen von wesentlicher Bedeutung. In den Resonanzsystemen übernehmen $\lambda/2$ Transformatoren die Aufgabe, die Ultraschall-Leistung zu übertragen und dabei die Schnelle zu transformieren.

Bei der Optimierung von Schnelletransformatoren steht die Kontur im Mittelpunkt der Untersuchungen, weil sie über die statische und dynamische Materialbelastung und somit über die Leistungsfähigkeit entscheidet. Die Qualität einer Kontur kann durch einen Formfaktor beschrieben werden, der sich als Verhältnis der maximalen Dehnamplitude eines zylindrischen Transformators zur Dehnamplitude des konturierten Transformators bei gleicher Ausgangsschnelle ergibt. Für eine begrenzte Anzahl von Konturen, für die die eindimensionale Schwingungsgleichung abschnittsweise lösbar ist, wurde zur Beurteilung der Kontur die auf der Grundlage dieses Rechenmodells ermittelten Formfaktoren herangezogen [1]. Dabei wurde vernachlässigt, daß durch die Konturierung im allgemeinen eine ungleichmäßige Spannungsverteilung im Querschnitt des Transformators hervorgerufen wird, die in Einzelfällen zu einer erheblichen Fehlbestimmung des Formfaktors führt. Wir sind zu der Einsicht gekommen, daß gerade für die technisch relevanten Transformatoren eine Verbesserung der Rechenverfahren erforderlich ist, um tatsächlich optimale Konturen aufzufinden.

Zur Beurteilung verschiedener Ansätze eines derartigen Rechenverfahrens ist eine Überprüfung der vorhergesagten Resonanzfrequenzen erforderlich. Die an gestuften Transformatoren mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Meßtechnik gewonnenen Daten sind für diesen Zweck besonders geeignet.

Meßtechnik

Ist der Schnelletransformator mit einem Resonanzsystem verbunden, zum Beispiel mit einem Schallerzeuger, so ist es schwierig, genaue Aussagen über die Schwingeeigenschaften zu gewinnen. Deshalb können Absolutmessungen der Resonanzfrequenz und des Transformationsverhältnisses nur an völlig frei schwingenden Transformatoren durchgeführt werden. Da diese Forderung experimentell nur annähernd erfüllt werden kann, ist die in der Meßanordnung beobachtete Güte des Transformators eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Qualität des Meßverfahrens.

Im Hinblick auf einen minimalen Beitrag der Meßapparatur zur Dämpfung müssen einerseits an die Halterung des Transformators und andererseits an die Erregung und Abtastung der Schwingungen hohe Anforderungen gestellt werden.

Zur Messung der Resonanzfrequenz

Zur Erzeugung und Abtastung der Schwingungen werden berührungslose elektrodynamische Wandler eingesetzt [2]. Sie ermöglichen aufgrund ihrer Richtcharakteristik eine gezielte Anregung und Analyse einzelner Resonanzen, während eine Dämpfung der Schwingungen wegen der

schwachen elektromagnetischen Wechselwirkung mit dem Transformator nicht beobachtet wurde.

Die Transformatoren werden in Anlehnung an FÖRSTER [3] in zwei massenarmen Kunststoffschlaufen aufgehängt. Im Unterschied zu FÖRSTER, der die Schlingen auch zur Anregung und Abtastung einsetzte, konnten wir die Schlingen so anordnen, daß die Lagerpunkte jeweils sehr nahe bei den Schwingungsknoten liegen. Dadurch wird die Dämpfung und Verstimmung des Transformators durch die Meßeinrichtung weiter verringert.

Die von uns mit dieser Anordnung (Abb.1) an Aluminium-Transformatoren beobachteten Güten lassen darauf schließen, daß der Einfluß der Aufhängung bei der Messung der Resonanzfrequenz vernachlässigt werden kann.

Güte der Torsionsschwingung 126000

Güte der Longitudinalschwingung 19000

Güte der Biegeschwingung 15000

Die Güte der Torsionsschwingung, die in erster Näherung nicht durch Schallabstrahlung in Luft gedämpft wird, ergibt einen Wert von $0,25 \times 10^{-4}$ für die innere Dämpfung in Al (logarithmisches Dekrement). Im Vergleich dazu ermittelte FÖRSTER $0,46 \times 10^{-4}$.

Unter Beachtung der Temperaturdrift - in Al ga. $3,8 \text{ Hz/K}$ bei 20 kHz und 20° C für alle Resonanzen - konnten die Resonanzfrequenz mit einer Meßunsicherheit von $0,1 \text{ Hz}$ bestimmt werden.

Diese Auflösung ermöglicht zum Beispiel den Nachweis des Dublettcharakters von Biegeresonanzen auch bei sehr genau gefertigten zylindrischen Schwingern. Abb.2 zeigt das Zusammenfallen eines Biegedubletts mit einer Longitudinalresonanz in einem Bereich von 6 Hz .

Zur Messung des Transformationsverhältnisses

Da zur Bestimmung des Transformationsverhältnisses das Verhältnis der Amplituden der Endflächen zueinander mit hoher Genauigkeit gemessen werden muß, müssen andere Anforderungen an den Aufbau des Meßplatzes gestellt werden, als bei der Messung der Resonanzfrequenz.

Die berührungslosen Wandler, die zur Bestimmung der Endflächenamplitude infrage kommen, zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit ihrer Empfindlichkeit vom Meßabstand. Diese Eigenschaft, die bei der Messung der Resonanzfrequenz unerheblich ist, muß beim Vergleich zwischen den Endflächenamplituden des Transformators sorgfältig berücksichtigt werden. Speziell der kapazitive Wandler zeigt bei allen Frequenzen die

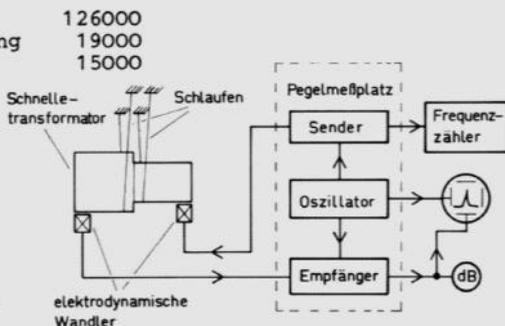


Abb. 1: Meßplatz für die Resonanzfrequenz von Schnelletransformatoren

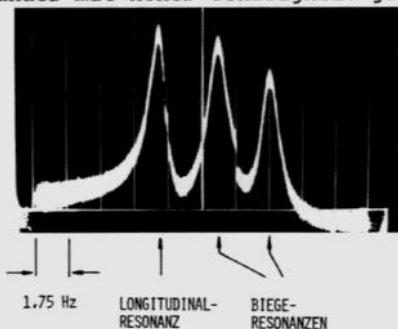


Abb. 2: Auflösung von Resonanzen eines Schnelletransformators bei $20,2 \text{ kHz}$

gleiche Abhängigkeit seiner Empfindlichkeit vom Meßabstand. Unser Meßverfahren nutzt diese Eigenschaft, um durch Testsignale einen Empfindlichkeitsvergleich für die an den Endflächen eingesetzten kapazitiven Wandler durchzuführen.

Zu diesem Zweck sind die kapazitiven Wandler in einem starren Rahmen befestigt, der von einem elektrodynamischen NF-Schwingerreger hin- und herbewegt wird. Die von den genau gleichgroßen Bewegungen der Wandler hergerufenen niederfrequenten Meßsignale werden in der Abb. 3 dargestellten Regelschaltung verarbeitet. Als Ergebnis des Amplitudenvergleichs wird dem NF-Schwingererregung zusätzlich ein Gleichstrom zugeführt, dessen Kraftwirkung den Schwingrahmen so verschiebt, daß die niederfrequenten Meßsignale genau gleiche Amplituden zeigen. Hierdurch wird gesichert, daß die kapazitiven Wandler auch hinsichtlich der Ultraschallschwingung gleiche Empfindlichkeiten aufweisen. An einem 1:1 Transformator stellten wir eine Meßunsicherheit von 10^{-3} fest.

Wegen der erforderlichen starren Halterung der zu untersuchenden Transformatoren müssen Stützadeln verwendet werden, die im Vergleich zu Schlaufen die Schwingung stärker beeinflussen. Je nach Stufung des Transformators beobachten wir Güten zwischen 250 und 1500.

Meßergebnisse

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen Meßergebnisse an scharfkantig gestuften Schnelletransformatoren aus zwei gleichlangen $\lambda/4$ Abschnitten verschiedenen Durchmessers. Die Messungen wurden jeweils so durchgeführt, daß das Durchmesserverhältnis eines Transformators in kleinen Schritten verringert wurde.

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der longitudinalen $\lambda/2$ Schwingung vom Durchmesser Verhältnis. Hier zeigt sich ein erheblicher Unterschied zu Aussagen der eindimensionalen Schwingungsgleichung.

MERKULOV und KHARITONOV erhielten einen ähnlichen Verlauf [4]. Sie äußerten die Vermutung, daß das Absinken der Resonanzfrequenz auf Biegeschwingungen zurückzuführen sei. Wir können diese Möglichkeit ausschließen, da bei unseren Untersuchungen neben der Longitudinalschwingung auch die anderen Moden abgetastet wurden.

Im Gegensatz zur Resonanzfrequenz zeigt der Vergleich der experimentell bestimmten Werte des Transformationsverhältnisses eine weitgehende Übereinstimmung mit den Aussagen der eindimensionalen linearen Rechnung. Im Bereich schwach gestufter Transformatoren liegt die relative Abweichung innerhalb der Meßunsicherheit.

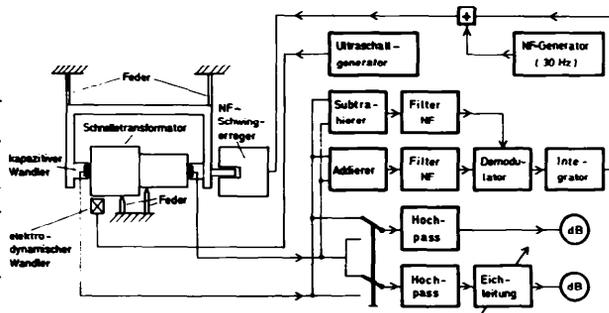


Abb. 3: Meßplatz für das Transformationsverhältnis von Schnelletransformatoren

Bis zu einem Transformationsverhältnis von 2 erreichen die relativen Abweichungen allerdings eine Größenordnung von 10^{-2} .

Abb. 4

Abhängigkeit der Resonanzfrequenz vom Durchmesser-
verhältnis

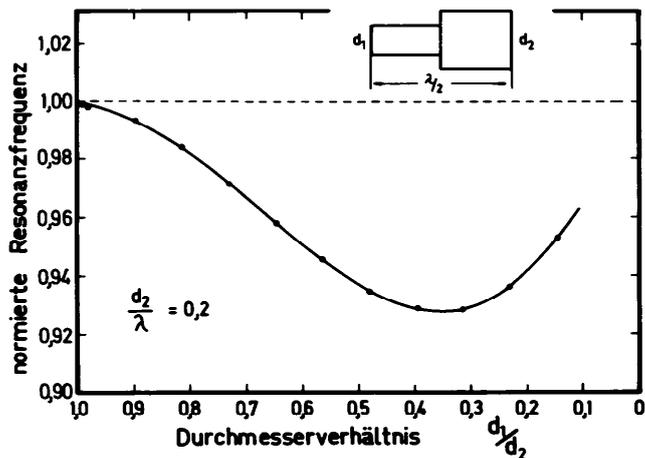
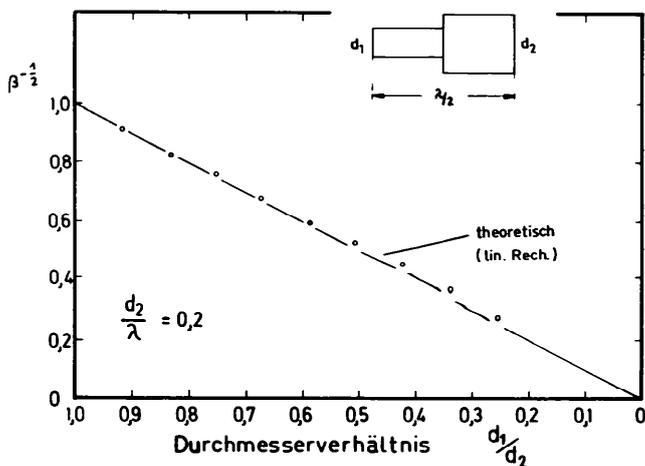


Abb. 5

Abhängigkeit des Transformations-
verhältnisses β vom Durchmesser-
verhältnis



- [1] NEPPIRAS, E. A. : Ultrasonics International 1977 S. 96-102
- [2] HERBERTZ, J. : Ultrasonics 5 (1967) S. 239-240
- [3] FÖRSTER, F. : Z. f. Metallkunde 4 (1937) S. 109-115
- [4] MERKULOV L. G. ; KHARITONOV, A. V. : Sov. Phys. Acoustics 5 (1959) S. 183-190

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