

# Vibroakustische Bewertung fluidgefüllter Transformatorenkessel mit periodischen Versteifungen

M. Ertl, N. Hassel

*Siemens Energy - Transformers, Nürnberg, Deutschland, Email: michael.ertl@siemens.com*

## Einleitung

Im Betrieb von fluidgefüllten Leistungstransformatoren führen Wicklungs- und Kernvibrationen zu Druckschwankungen im Fluid, die nach mehrfachen Fluid-Struktur-Wechselwirkungen die Tankwände sowie angekoppelte Strukturelemente zu Schwingungen anregen. Die dünnwandigen Kesselwände sind typischerweise 6 – 20 mm dick und werden zur Erhöhung der statischen Festigkeit periodisch durch vertikale I- oder U-Profile versteift (Abb. 1). Dynamische und akustische Kriterien wurden hierbei bisher nicht berücksichtigt. Um die verschärften gesetzlichen Geräusch-Emissionsgrenzwerte erfüllen zu können, müssen die primären Schallquellen in Tankinneren reduziert und die Schalldurchgangs- und Schallabstrahlcharakteristik des Transformators optimiert werden. Hierbei ist ein Tankdesign gefordert, daß bei minimalen Herstellungs- und Materialkosten neben der geforderten statischen Druckfestigkeit ein optimiertes Geräuschdesign aufweist. Insbesondere müssen resonante Tankschwingungen bei den diskreten Anregungsfrequenzen des Transformators (100Hz, 200Hz, . . . , 600Hz) vermieden werden. In dieser Arbeit werden einzelne Verrippungsparameter wie z.B. Rippenanzahl, -geometrie und -form selektiv untersucht und verschiedene Tankversteifungsstrategien vibroakustisch bewertet.

## Verrippung: Mechanische Effekte

Periodische Versteifungen an der Tankwand führen zu einer richtungsabhängigen Erhöhung der Biegesteifigkeit entlang der Versteifungshauptachsen. Die Tankwand mit ursprünglich isotropen mechanischen Eigenschaften weist nun orthotrope Eigenschaften auf. Die veränderte Biegesteifigkeit hat wesentliche Änderungen in der Modendichte, den Schwingungsformen sowie in der Lage der Eigenfrequenzen zur Folge. Bei fluidgefüllten Transformatorenkessel mit internen Schallquellen werden die Plattenstrukturen der Tankwände akustisch angeregt. In dieser Konfiguration weisen Versteifungsrippen durch die breitflächige Anregung eine sehr geringe akustische Wirkung auf. Eine Verrippung ist akustisch nur vorteilhaft, wenn bei mechanischer Anregung die Rippen am Krafteinleitungsort positioniert werden. Da die Verrippung lediglich einseitig auf der äußeren Tankwandseite erfolgt, ist die Symmetrie gegenüber der Medianebene der Tankwand nicht mehr gegeben. Diese unsymmetrische Konfiguration koppelt Schub- und Dehnwellen mit Biege-Wellen [3]. Die veränderten Randbedingungen für die Normalauslenkung, Rotation und Torsion durch die Versteifungen resultieren in weitaus komplexeren und ungleichförmigeren

Schwingungsmustern; der Sprung in der mechanischen Impedanz an der Kopplungsstelle zum Versteifungsprofil führt zu einer teilweisen Reflektion der einfallenden Biege-Wellen. Schließlich belegen die Versteifungsprofile die Tankwand mit einer schwingungsfähigen Zusatzmasse. Die dynamischen Auswirkungen der Tankwandversteifung sind sehr stark vom betrachteten Frequenzbereich abhängig. Im unteren Frequenzbereich mit gegenüber der Biege-Wellenlänge  $\lambda_b$  sehr viel kleineren Rippenabstand  $d$  'verschmiert' die zusätzliche Biegesteifigkeit der diskreten Verrippungen über das Strukturkontinuum der Tankwand [1]. Die unteren Moden zeigen im Vergleich zur unversteiften Tankwand identische Schwingungsformen, jedoch bei erhöhten Frequenzen. Bei höheren Frequenzen ( $d \gg \lambda_b$ ) und sehr steifen Rippen wird die Tankwand in eine Serie kleiner Platten mit einfachen Randbedingungen unterteilt. Real haben jedoch die Versteifungsprofile gegenüber der Tankwand keine sehr hohen Biege- und Torsionsteifigkeiten. Die Rippen- und Tankwandschwingungen sind dadurch stets eine direkte Folge der modalen Schwingung des gesamten Kessels. Die Randbedingungen einer Tankwandsektion oder einer Versteifung werden somit durch die dynamischen Eigenschaften der gesamten mechanischen Struktur bestimmt und sind dadurch frequenzabhängig. Der einseitige Fluidbelag an der Kesselwand bewirkt im relevanten Frequenzbereich primär eine Zusatzmasse. Die daraus resultierende Frequenzabsenkung ist von der Modenform abhängig und nimmt mit steigender Frequenz bei höheren Moden ab [2].

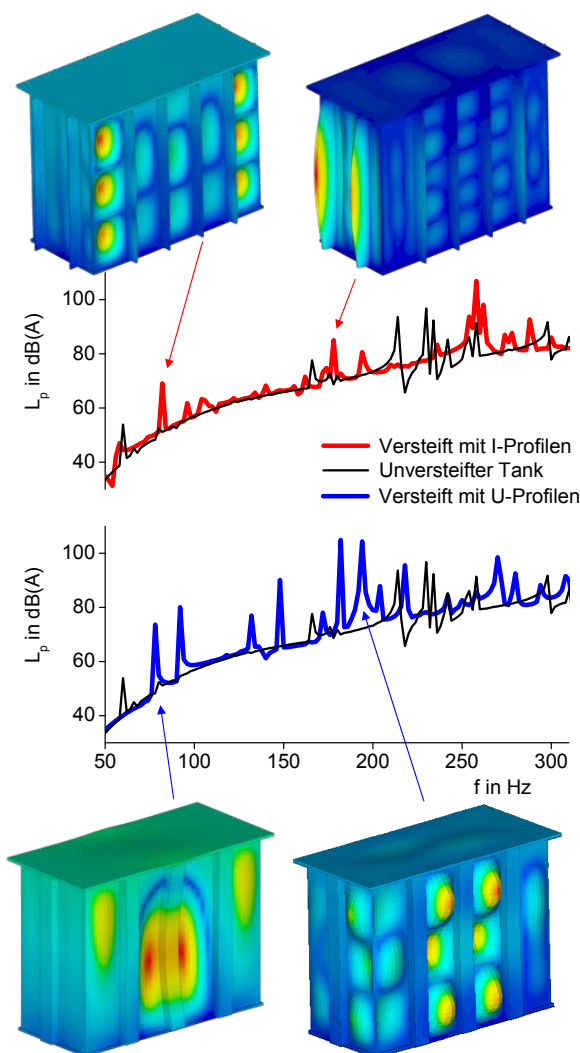
## Verrippung: Akustische Effekte

Im Frequenzbereich des hörbaren Transformatorgeräusches bis 1kHz erfolgt die Schallabstrahlung der Tankwände ausschließlich unterhalb ihrer Koinzidenzfrequenz. Eine Versteifung der Tankwände reduziert zwar deren Schwingungsenergie, erhöht aber gleichzeitig deren Abstrahlgrad (die höhere Biegesteifigkeit senkt die Koinzidenzfrequenz). Eine systematische Geräuschabsenkung kann durch die beiden gegenläufigen Effekte somit durch eine Tankwandversteifung nicht erreicht werden. Durch die Verrippung erfährt der Transformator-tank eine wesentliche Vergrößerung der schallabstrahlenden Oberfläche um 50% bis zu 90%. Querschwingende Rippenstrukturen können so als zusätzliche (Linien-) Schallquellen betrachtet werden. Diese können sowohl eine Gesamtpegelerhöhung oder -erniedrigung bewirken, abhängig vom Verhältnis der Wellenlänge zum Rippenabstand, von der Modenform und ob benachbarte Rippen gleich- oder gegenphasig schwingen [4]. Weiterhin wirken insbesondere bei geringen Rippenabstand und

großer Rippenhöhe die Versteifungsprofile als akustische Barrieren. Je nach Relation dieser Geometrieparameter zur Wellenlänge des abgestrahlten Luftschalls werden wiederum signifikante Geräuscherhöhung oder -absenkung verursacht [4].

## Vibroakustische Bewertung

Als Referenz für die vibroakustische Bewertung verschiedener Verrippungsparameter wurde ein Glattwandtank ohne Versteifungen gewählt. Als Parameter werden die Anzahl der Versteifungen, die Versteifungsgeometrie (Rippenhöhe und -breite) sowie die Versteifungsgeometrie (I- und U-Profil) variiert. Der jeweilige Frequenzgang des Schallübertragungsverhaltens wird in einer harmonischen FEM-Rechnung mit Fluid-Struktur-Kopplung bei diffuser Anregung im Tankinneren ermittelt.



**Abbildung 1:** Frequenzgänge verschieden versteifter Transformator-kessel mit dominanten Tankwand- und Versteifungsresonanzen

Die vibroakustischen Auswirkungen der Versteifung lassen sich allgemein zusammenfassen:

- Die Versteifungen erhöhen die Frequenz der ersten Schwingungsmode, die meist eine Lateralschwingung

des gesamten Kessels darstellt.

- Die Versteifungen ändern fundamental die Schwingungsformen und die Frequenzlage akustisch wirksamer Resonanzen.

Das Schallübertragungsverhalten wird von resonant angeregten Schwingungsformen dominiert, bei denen (a) großflächige Tankwandschwingungen oder (b) die Versteifungen beteiligt sind (Abb. 1). Versteifungen mit I-Profilen zeigen ausschließlich Querschwingungen, während bei Versteifungen mit U-Profilen Längsschwingungen in Normalrichtung der Tankwand bedeutsam sind. Torsionsschwingungen der beider Profile sind im relevanten Frequenzbereich bis 800Hz nicht zu beobachten.

Einzelne Versteifungsparameter, z.B. die Anzahl der I-Profil-Versteifungen, verbessern die Schallabstrahlcharakteristik im Frequenzbereich bei 200Hz, durch die vielen zusätzlichen Resonanzfrequenzen oberhalb 200Hz ergibt sich im Gesamtschallpegel des Transformators jedoch wiederum eine Verschlechterung. Bei gleicher Anzahl an Versteifungen verschlechtert sich mit zunehmender Höhe der Profile das akustische Übertragungsverhalten des Transformator-kessels, unabhängig von der Profilform der Versteifungen. Die zusätzlichen Schwingungsfreiheitsgrade erhöhen die Modendichte und den Gesamtschallpegel.

## Zusammenfassung

Die Verrippung der Kesselwände von fluidgefüllten Leistungstransformatoren erweist sich hinsichtlich der akustischen Abstrahlung als nachteilig, da sie eine Zunahme der Schwingungsfreiheitsgrade und der schallabstrahlenden Fläche bewirken. Die akustischen Effekte einzelner Verrippungsparameter lassen sich nicht allgemein kategorisieren und haben je nach Parameterpaarung eine Zu- oder Abnahme des Gesamtschallpegels zur Folge. Verschiedene praktisch umsetzbare Verrippungsstrategien zeigen im Gesamtgeräuschpegel durch die vielen diskreten Anregungsfrequenzen des Transformator keine nennenswerten Unterschiede.

## Literatur

- [1] BLEVINS, Robert: *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Krieger Pub Co, 2001
- [2] ERTL, Michael ; LANDES, Hermann: Vibroacoustics and sound emission characteristics of thin-walled, oil-immersed transformer vessels. In: *Proceedings of DAGA, Rotterdam, 2009*
- [3] FAHY, Frank J. ; GARDONIO, Paolo: *Sound and Structural Vibration. Radiation, Transmission and Response*. 2nd ed. Academic Press, 2006. – ISBN 0123736331
- [4] MOYNE, S. L. ; TEBEC, J. ; TAWFIQ, I.: Acoustical influence of stiffeners on acoustic radiation of plates. In: *Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005)*, Nr. 1, S. 195–212