

Kombinierte Fluid-Struktur-Schwingungen in fluidgefüllten Leistungstransformatoren

Michael Ertl¹, Hermann Landes²

¹ Siemens Energy - Transformers, Nürnberg, Deutschland, Email: michael.ertl@siemens.com

² SIMetris GmbH, Erlangen, Deutschland, Email: hlandes@wissoft.de

Einleitung

Im Betrieb von fluidgefüllten Leistungstransformatoren führen innere Schallquellen (Wicklungs- und Kernvibrationen) zu Druckschwankungen im Fluid, die die Tankwände akustisch breitflächig zu Schwingungen anregen und Schall in die Umgebung abstrahlen. Die daraus resultierenden Geräuschpegel lassen sich durch empirische Gleichungen im Mittel relativ gut abschätzen. Regelmäßig treten jedoch unvorhergesehene Geräuschüberhöhungen auf, die keinen resonanten Strukturschwingungen zugeordnet werden können. Die gegebene Anordnung - ein rechteckigen Hohlraum, der mit einem schweren Fluid gefüllt und mit einem dünnwandigen und biegeweichen Tank berandet ist - lässt gekoppelte Schwingungsmoden erwarten. In dieser Arbeit werden einzelne Aspekte dieser starken Fluid-Struktur-Wechselwirkungen systematisch untersucht. Insbesondere wird der Einfluss von Festkörperstrukturen im Fluid (Wicklungen, Kern) auf die Verschiebung der Eigenfrequenzen gekoppelter Moden erörtert.

Gekoppelte Hohlraummoden

Stehende Wellen werden in fluidgefüllten Hohlräumen bei den Frequenzen

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (1)$$

angeregt, wenn die Hohlraumabmessungen L_x , L_y und L_z ein Vielfaches der halben Wellenlänge λ der zugehörigen akustischen Welle im Fluid sind. In Gleichung 1 beschreiben $l, m, n = 0, 1, 2, \dots$ die Modenzahlen und c die Schallgeschwindigkeit im Fluid. Bei typischen Abmessungen von Leistungstransformatoren zeigt sich im hörbaren Frequenzbereich von Transformatorgeräuschen (100Hz – 800Hz) mit < 10 Hohlraummoden eine geringe Modendichte. Die Auswirkung einer stehenden Welle auf das akustische Übertragungsverhalten ist stark von deren Modenform abhängig und wird von stehenden Wellen zwischen großflächigen Berandungen dominiert. Hingegen zeigen Modenformen, die sich zwischen gegenüberliegenden und mechanisch steiferen Tankkanten und -ecken ausbilden, nur eine geringe akustische Relevanz.

Im untersuchten Fall eines Transformatortanks mit akustisch ungünstigen quadratischen Grundriss ist zu erwarten, dass sich stehende Wellen in Längs- und Breitrichtung des Tanks bei annähernd gleichen Frequenz ausbilden. Tatsächlich wurden starke

Geräuschüberhöhungen gemessen, jedoch konnten aus der Tankgeometrie keine Hohlraummoden in der Nähe der Anregungsfrequenzen abgeleitet werden. Hier zeigen gekoppelte Fluid-Struktur-Rechnungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode einen wesentlichen Einfluß von Festkörperstrukturen, die den fluidgefüllten Hohlraum beranden oder im Fluid eingeschlossen sind. So stellt der dünnwandige, biegeweiche Tank akustisch keine schallharte Randbedingung, sondern näherungsweise eine akustisch weiche Randbedingung mit Schalldruckminima bzw. Schallschnellemaxima an den Berandungen dar. Durch die starke Fluid-Struktur-Kopplung zwischen Mineralöl im Hohlraum und der Tankwandberandung wirkt im niederfrequenten Bereich die Tankwand primär als Zusatzmasse und führt insbesondere bei größeren Tankwanddicken zu einer wesentlichen Absenkung der Eigenfrequenzen einer stehende Wellen im Tankinneren.

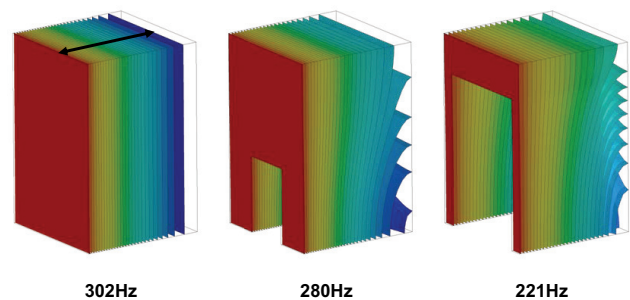


Abbildung 1: Frequenzabsenkung und Wellenfeldverzerrung des ersten akustischen Längsmodes bei unterschiedlich großen Festkörperstrukturen im Fluidvolumen

Weiterhin führen der Transformator Kern und die Wicklungen als kompakte, ungeschlossene Festkörperstrukturen im fluidgefüllten Hohlraum zu einer Änderung des resonanzfähigen Fluidvolumens sowie der schwingenden Fluidmasse. Vibroakustisch entscheidend ist jedoch die Deformation des Wellenfeldes durch die Änderung der Schallwellen-Randbedingungen an der Strukturoberfläche (Abb. 1). So bleiben selbst bei sehr großen Festkörperstrukturen im Fluidraum die Modenformen von Hohlraummoden bestehen, jedoch führt die starke Verzerrung des Wellenfeldes (durch eine effektive Abstandsverlängerung) zu einer wesentlichen Frequenzabsenkung.

Nicht die Größe, sondern die Geometrie des im Fluidraum eingeschlossenen Festkörpers bestimmt hierbei das Ausmaß der Feldverzerrung sowie der Frequenzabsenkung. Sind große Querschnittsflächen des umschlossenen

Festkörpers in Richtung der stehenden Welle orientiert, dominieren die akustischen Randbedingungen des umschlossenen Festkörpers das Wellenfeld. Hingegen hat eine großflächige Struktur mit der Schmalseite in Wellenrichtung einen vernachlässigbaren Einfluss auf den entsprechenden Hohlraummode (Abb. 2).

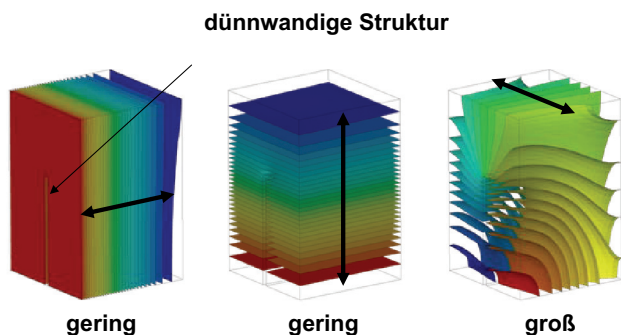


Abbildung 2: Einfluss der Querschnittsform eines Festkörpers im Fluidvolumen auf die Wellenfeldverzerrung einer stehenden Welle.

Gekoppelte Strukturmoden

Im ölgefüllten Tank sind die biegeweichen und dünnwandigen Plattenstrukturen des Tanks einseitig mit einem schweren Fluid beladen. Auf schwingende, großflächige Tankwände wirkt das mitbeschleunigte schwere Fluid im unteren Frequenzbereich bis primär als Zusatzmasse und führt zu einer deutlichen Absenkung der Tankwand-Eigenfrequenzen (bis max. Faktor 2,2). Dadurch tritt gegenüber dem leeren Tank für Strukturmoden eine wesentliche Erhöhung der Modendichte in Frequenzbereich 100-800Hz auf. Der Masseneffekt sowie die Frequenzabsenkung ist sehr stark von der Modenform der Tankwand abhängig und nimmt mit steigender Frequenz bei höheren Moden ab [1].

Kombinierte Akustik-Struktur-Moden

Kombinierte Akustik-Struktur-Moden treten bei identischen Eigenfrequenzen von Hohlraum- und Plattenmoden auf. Jedoch ist die Kopplung beider Moden nur bei Ähnlichkeit der räumlichen Druckverteilung effizient (großer modaler Kopplungskoeffizient). Eine starke Erhöhung der Tankwandvibrationen und Schallabstrahlung tritt also nur bei der Kopplung bestimmter Modenformen auf (Tab. 1), siehe auch [3, 2]. In Tabelle 1 werden mit *g* geradzahlige, mit *u* ungeradzahlige sowie mit *x* beliebige Modenummern bezeichnet.

	u,u,x	g,g,x	u,g,x	g,u,x
u,u		•		
g,g	•			
u,g				•
g,u			•	

Tabelle 1: Kopplungsmatrix für Plattenmoden (vertikal) - und Hohlraummoden (horizontal)

Das mit einem dünnwandigen Tank umschlossene Fluidvolumens kann aufgrund der starken Fluid-Struktur-Kopplung weiterhin als gekoppelter Oszillator aufgefasst werden, wobei die Tankwände als Massen und das kompressible Öl als Feder wirken. Insbesondere bei geringen Tankwandabständen ist in numerischen Rechnungen eine Frequenzaufspaltung erkennbar. Der gleich Plattenmode tritt doppelt auf - gleich- und gegenphasig bei leicht unterschiedlichen Frequenzen. Bei höheren Abständen hingegen ist der Steifigkeitseffekt des umschlossenen Fluides vernachlässigbar.

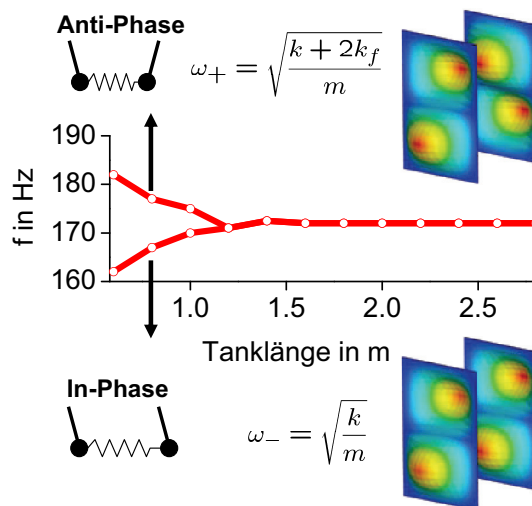


Abbildung 3: Bei kleinen Tankgrößen wirkt das Platten-Fluid-Platte-System als gekoppelter Oszillator

Zusammenfassung

Starke Fluid-Struktur-Kopplungen bestimmen das vibroakustische Verhalten ölgefüllter Leistungstransformatoren. Durch die Kopplung treten sowohl bei Hohlraum- als auch bei Strukturmoden deutliche Absenkungen der Eigenfrequenzen auf, deren Vorausberechnung die Modellierung aller am Fluidvolumen angrenzenden Festkörperstrukturen erfordert.

Literatur

- [1] ERTL, Michael ; LANDES, Hermann: Vibroacoustics and sound emission characteristics of thin-walled, oil-immersed transformer vessels. In: *Proceedings of DAGA, Rotterdam, 2009*
- [2] PAN, Jie ; BIES, David A.: The effect of fluid-structural coupling on sound waves in an enclosure - Experimental part. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 87 (1990), Nr. 2, S. 708-717
- [3] PAN, Jie ; BIES, David A.: The effect of fluid-structural coupling on sound waves in an enclosure - Theoretical part. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 87 (1990), Nr. 2, S. 691-707