

# Simulation von Shakerversuchen an flüssigkeitsgefüllten Tanksystemen

Marinus Luegmair, Michael Trost

ISKO engineers AG; Bereich Strukturdynamik und Akustik; 80807 München,  
E-Mail: marinus.luegmair@isko-engineers.de

## Einleitung und Motivation

Tanksysteme in Kraftfahrzeugen sind aus Gewichtsgründen meist aus Kunststoffen gefertigt und müssen schwingungstechnische Anforderungen erfüllen. Diese werden entsprechend Lastenheft in einem Shakerversuch mittels Rauschanregung überprüft. Durch FE-Simulation lässt sich der Shakerversuch im Frequenzbereich berechnen.

Mit der Flüssigkeit muss ein Tank ein Vielfaches seines Eigengewichtes aufnehmen. Das verschiebt seine Resonanzen (Eigenfrequenzen) deutlich hin zu niedrigeren Frequenzen. Eine Berechnung des Tanks ohne Berücksichtigung des Flüssigkeitsinhalts liefert daher falsche Ergebnisse.

## Physikalische Randbedingungen

Für einen exemplarischen Tank (Abmessungen: 478 x 432 x 183 mm), der im Folgenden betrachtet wird, ergeben sich mehrere Eigenfrequenzen im hier angeregten Frequenzbereich von 5 - 100 Hz, wie er typisch für Schwingprüfungen ist. Das enthaltene Fluid jedoch besitzt hier noch keine Eigenfrequenzen wie sich mit der Formel für die erste Eigenfrequenz des Fluid [1]

$$f = \frac{c}{2 \cdot l} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

mit der max. Seitenlänge  $l = 0,478$  m und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c = 2080$  m/s ergibt:

$$f_{1. \text{Eigenfrequenz}} = 2176 \text{ Hz}$$

## Abbildungsmöglichkeiten in der FEM

Für die Berücksichtigung des Flüssigkeitseinflusses auf das dynamische Verhalten des Tanks bieten sich in der FEM verschiedene Möglichkeiten an:

- Leerer Tank ohne Berücksichtigung der Flüssigkeit (Als Vergleich bzw. bei Ignorieren des Fluid)
- Tank mit Punktmasse (über Interpolationselement mit allen benetzten Schalenelementen gekoppelt)
- Tank mit verschmierter Masse (pro Schalenelement eine Punktmasse - Non Structural Mass NSM)
- Tank mit Fluidelementen (Fluid-Struktur-Analyse auf modaler Basis)
- Tank mit Virtueller Masse

## Abbildung des Fluids als Virtuelle Masse

Da die erste Resonanz des Fluids weit über dem zu berechnenden Frequenzbereich liegt, kann eine mathematische Modellierung analog zur Randelementemethode verwendet werden [2]

$$(\dot{u}_i, p_i) = \sum_j \int_{A_j} \frac{\vec{e}_{ij}}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2} (q_j, \dot{q}_j) dA_j \quad (2)$$

Hierbei ist  $u$  die Verschiebung senkrecht zur Tankwand,  $p$  der Druck je Element,  $e_{ij}$  der Einheitsrichtungsvektor zwischen zwei Elementen,  $r$  der Ortsvektor eines Element,  $q$  die Quellstärke der äquivalenten Fluidquelle und  $A$  die Elementfläche.

Vorraussetzung für die Gültigkeit dieser Modellierung ist, dass die Eigenfrequenzen der Flüssigkeit höher als der betrachtete Bereich liegen (Fluid kann als inkompressibel angenommen werden) und dass der Tank nicht vollständig mit Fluid gefüllt ist. Diese Bedingungen erfüllen Tanksysteme bei nicht vollständiger Füllung (wie im Versuch aber auch im Feld üblich).

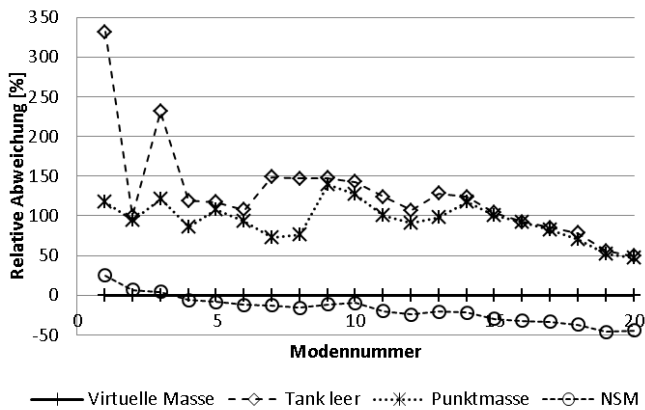
## Diskussion der Abbildungsgüte

Entscheidend für die Wahl der Abbildung des Flüssigkeitseinflusses ist die Qualität der Ergebnisse.

Wie in Tabelle 1 deutlich zu erkennen ist, besitzt die Abbildungsmethode erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Modalanalyse. Zudem ist zu erkennen, dass keines der alternativen Berechnungsmodelle die Ergebnisse der Virtuellen Masse nachstellen kann.

**Tabelle 1:** Berechnete Eigenfrequenzen eines montierten Kunststofftanks in Hz, Wandstärke 5 mm mit 38 Liter Fassungsvermögen, zu 3/4 mit Wasser gefüllt

Eigenfrequenz	Virtuelle Masse	Ohne Flüssigkeit	Punktmasse	Verteilte Masse
1	8,7	37,7	19,0	10,9
2	20,2	40,4	39,3	21,5
3	22,6	75,0	50,1	23,6
4	36,3	79,5	67,7	34,1
5	37,4	81,28	77,6	34,2
6	42,2	87,37	81,5	36,9



**Abbildung 1:** Darstellung der relativen Abweichung der Eigenfrequenzen der einzelnen Modellierungsmöglichkeiten der Flüssigkeit im Vergleich zur Virtuellen Masse

Zur weiteren Verdeutlichung der Ungenauigkeiten findet sich in Abbildung 1 die prozentuale Abweichung der einzelnen Abbildungsmethoden im Vergleich zur Virtuellen Masse.

Besonders im Bereich der ersten Eigenfrequenzen ergibt sich durch die Flüssigkeit eine extreme Abweichung (bis zu 330%) vom leeren Tank. Somit ist es unumgänglich die Flüssigkeitsfüllung zu betrachten. Aber auch die Abbildung als physikalische Masse, ob verteilt oder konzentriert, kann die Flüssigkeit nicht vollständig beschreiben, da ihre Steifigkeit [3] und die somit gegebene Kopplung der Tankwände über diese fehlt. Eine Abbildung, die exakte Ergebnisse liefern müsste, ist die Modellierung der Flüssigkeit und der darüber liegenden Luft mit Fluidelementen. Hier liegt aber ein Problem in der Berechnungsmethode. Da der modale Ansatz erst die Eigenfrequenzen von Tank und Fluid getrennt berechnet und dann überlagert, fehlt die Kopplung von Fluid und Struktur. Entsprechend ergeben sich dadurch im betrachteten Frequenzbereich dieselben Eigenfrequenzen wie die des leeren Tanks, weshalb diese in Tabelle 1 auch nicht explizit aufgeführt sind. Die Kopplung von Tank und Fluid ist bei Luftkavitäten in guter Näherung vernachlässigbar, weil die Luft die Eigenfrequenzen der Struktur kaum beeinflusst [4]. Die Kopplung von Struktur und Fluid erfolgt erst zum Zeitpunkt einer Resonanzrechnung was hier ausreichend ist. Die hohe Steifigkeit von Wasser verändert hier die Eigenfrequenzen der Struktur so gravierend, dass diese Rückwirkung unbedingt bereits in der Modenberechnung betrachtet werden muss.

## Modellierungs- und Berechnungsaufwand

Für die Anwendung einer Methode ist nicht nur die Güte der Ergebnisse entscheidend, sondern auch der Modellierungs- und Berechnungsaufwand.

Seitens der Modellierung sind alle oben genannten numerischen Modellierungsmöglichkeiten mit einem modernen Preprozessor etwa gleich schnell durchführbar. Hinsichtlich Rechenzeit, sind der leere Tank und die Abbildung als verteilte Masse vergleichbar. Die Berechnungsdauer bei Benutzung der Virtuellen Masse hängt von

der Anzahl der mit Flüssigkeit benetzten Elemente ab und steigt entsprechend mit der Modellgröße bzw. bei Netzverfeinerung, ist aber von vertretbarer Größe. Lediglich die Verteilung des Einflusses einer einzelnen Punktmasse über ein Interpolationselement (z.B. RBE3 in NASTRAN [5]) auf alle benetzten Elemente erhöht die Rechenzeit so extrem, dass der Aufwand nicht mehr vertretbar ist.

## Anwendung im Automobilbereich

Wie gezeigt, darf der Einfluss der Flüssigkeit in Tanksystemen auf keinen Fall vernachlässigt werden. Zudem ergeben einfache Näherungen wie etwa reine Masse ebenfalls falsche Ergebnisse. Bei einer exakten Abbildung des Fluid mit Fluidelementen kann nicht mit dem modalen Ansatz gerechnet werden. Aber die Modellierung lässt sich einfach mittels virtueller Masse umsetzen. Die physikalischen Voraussetzungen für die Gültigkeit der Methode sind bei allen Tanksystemen innerhalb eines Autos gegeben, wodurch die Virtuelle Masse verlässliche Ergebnisse liefert.

Bei Verwendung der virtuellen Masse wird der Effekt der Flüssigkeitsfüllung bereits in der Modalanalyse berücksichtigt. Deshalb kann die berechnete modale Basis für die Generierung eines Superelementes verwendet werden. Hiermit lassen sich die Tanksysteme einfach in größere Modelle wie etwa Fahrzeugkarosserien integrieren.

Natürlich kann das Modell auch direkt für die Simulation von Shakerversuchen verwendet werden. Aus diesen Berechnungen lassen sich nicht nur die Verschiebungen des Tanks sondern auch die Spannungen als PSD-Werte (Power Spectral Density) und die entsprechenden RMS-Spannungswerte (Root Mean Square) berechnen. Der Vergleich dieser Spannungswerte mit experimentell ermittelten Festigkeitswerten der entsprechenden Materialien erlaubt sogar eine Lebensdauerbewertung der Tanksysteme. Konstruktionsvarianten können somit virtuell und ohne zusätzliche Versuche bewertet werden.

## Literatur

- [1] Möser, M.: Technische Akustik. 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [2] Siemens PLM: NX Nastran Advanced Dynamic User's Guide. 2005
- [3] Fahy, F.: Foundations of Engineering Acoustics. 2nd Edition, Academic Press, London, 2003
- [4] Zeller, P. (Hrsg.): Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- [5] Siemens PLM: NX Nastran Quick Reference Guide. 2010