Numerische Simulation von Schwappen und Schwappgeräuschen bei generischen Fahrzeugtanks

Carlos Falquez[1], Iris Pantle[1], Balazs Pritz[1]

[1] *Falquez, Pantle und Pritz GbR, 76131 Karlsruhe, Deutschland, Email: contact@nuberisim.de*

Einleitung

Schwappgeräusche von Kraftstofftanks in hybriden Fahrzeugen stellen gegenüber Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor ein ernstzunehmendes Problem dar. Sobald andere Lärmquellen wegfallen - z.B. wenn das Fahrzeug abrupt abgebremst wird, zum Stehen kommt und der Verbrennungsmotor abschaltet - treten die Schwappgeräusche deutlich hervor und beeinträchtigen das Komfort-Empfinden der Fahrzeuginsassen. Für die Hersteller von Tanks erzeugt dies einen Wettbewerb, wobei die bautechnische Optimierung hauptsächlich experimentell, jedoch kaum mit Hilfe numerischer Schwapp- und Lärmprognose-Werkzeuge durchgeführt wird. Die numerischen Simulationsverfahren (Computational Fluid Dynamics/CFD, Fluid-Struktur-Interaktion) sind zeitaufwändig und werden daher nur im Einzelfall durchgeführt. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der vereinfachten Modellierung von 2-Phasen-Vorgängen durch CFD. Zielsetzung ist, daraus das Schwappgeräusch zu bestimmen.

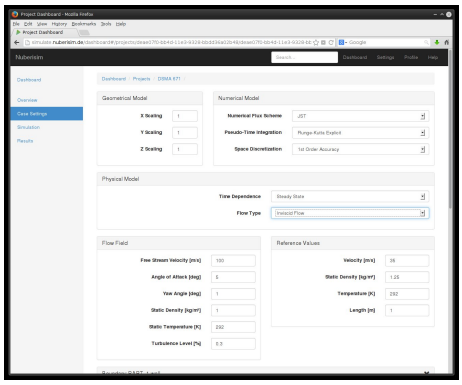

Abbildung 1: Schnappschuss der NUBERISIM-Simulationsplattform für CFD.

Dazu wurde eine vereinfachte Ghost Fluid Methode (GFMP) [1] in eine CFD-Software des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) implementiert. Die Autoren sind Lizenznehmer der Software und entwickeln sie für ausgewählte Anwendungen weiter. Die Software wird in Zukunft auf der Cloud-basierten NUBERISIM-Plattform für technische Hochleistungssimulation der Falquez, Pantle und Pritz GbR [4] nutzbar sein. Die hier diskutierten Implementierungen sind noch nicht abgeschlossen. Sie wurden im Rahmen des EXIST-Gründungsprojekts SiFloA, worin die NUBERISIM-Plattform für CFD-Simulation entwickelt wurde, und das zur Gründung des Unternehmens führte, entwickelt. Die Plattform selbst (vgl. Abb. 1) wurde auf der Hannover-Messe im April 2014 zum ersten Mal vorgestellt.

Numerisches Verfahren

Die GFMP nach Farhat & al. [1] lässt sich mit einem kompressiblen single-fluid Verfahren – hier Mehrschritt-Runge-Kutta – koppeln. Die Darstellung ist vereinfacht und es werden Einbußen in der Genauigkeit erwartet, wobei diese der Güte der Validierungsdaten vergleichbar ist. Für zwei benachbarte Zellen mit den Indizes i und j im Simulationsraum gilt:

$$\begin{aligned} \varphi_i^n \times \varphi_j^n > 0 \qquad & \phi_{ij}^n = \mathcal{RK}(F_i^n, F_j^n, \\ & \mathcal{EOS}(\gamma_i = \gamma_j, \pi_i = \pi_j), n_{ij}) \qquad (1) \\ \varphi_i^n \times \varphi_j^n \leq 0 \qquad & \longrightarrow \\ & \phi_{ij}^n = \mathcal{RK}(F_i^n, F_j^n, \\ & \mathcal{EOS}(\gamma_i, \pi_i), n_{ij}) \\ & \phi_{ji}^n = \mathcal{RK}(F_j^n, F_i^n, \\ & \mathcal{EOS}(\gamma_j, \pi_j), n_{ji}), \qquad (2) \end{aligned}$$

mit dem Fluss-Term ϕ, der Distanz-Größe φ zur Phasengrenze, den Grenzflächennormalen $n_{ij} = -n_{ji}$, dem zellbezogenen Fluss F, und dem Zeitindex n. Die Abkürzung $\mathcal{RK}$ steht für Runge-Kutta-Schema, die Abkürzung $\mathcal{EOS}$ für Zustandsgleichung. Die Größen γ und π sind Bestandteile der Zustandsgleichung (Gl. 3). Gl. 1 gilt, wenn beide Zellen durch dieselbe Phase besetzt sind, Gl. 2 gilt, wenn die Zellen durch unterschiedliche Phasen besetzt sind.

Als Zustandsgleichung für beide Fluide (Gas-Gas, Gas-Flüssigkeit) wird die steife Gasgleichung (Gl. 3) verwendet:

$$(\gamma - 1)\rho e = p + \gamma\pi, \qquad (3)$$

mit Dichte ρ, innerer Energie pro Masse e, Druck p, dem Adiabaten-Koeffizienten γ und der fluid-spezifischen Konstante π ($\pi = 0$ bei idealem Gas, $\pi \approx 10^8$ bei Flüssigkeiten).

Für die akustische Auswertung kann auf Standard-Module in der KIT-Software zugegriffen werden (integrale Analyse nach Ffowcs-Williams und Hawkings [2], feldweise Analyse nach Tam und Webb[3]). Weitere Analyse-Verfahren, z.B. eine Schallschnelle-Analyse nach Rayleigh gekoppelt an Verfahren für Fluid-Struktur-Interaktion (FSI), sind in Entwicklung.

Visualisierungen erste Simulationen

Erste 2-Komponenten-Simulationen mit der neu implementierten Ghost Fluid Methode (GFMP) sind in den

Abb. 2 dargestellt. Gezielte qualitative und quantitative Vergleich stehen noch aus und sollen anhand der im nächsten Abschnitt beschriebenen Untersuchungen erfolgen. Auch hier liegen noch nicht alle Ergebnisse vor.

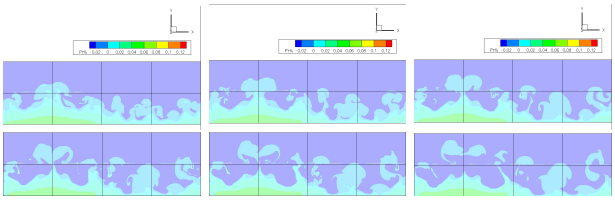

Abbildung 2: Diffusionsprozess zweier Gase: Helium in Luft (Sequenz zeilenweise von links nach rechts).

Visualisierungen Experiment

Für spätere Validierungen wurde eine Verfahren bei der Firma TIAutomotive in Rastatt [6] in Kooperation mit dem Fachgebiet Strömungsmaschinen des KIT [5] sowie der Falquez, Pantle und Pritz GbR [4] in Karlsruhe im Rahmen einer Diplomarbeit [7] aufgebaut, um Erstuntersuchungen an generischen, optisch zugänglichen Tanks durchzuführen. Dabei wurden quaderförmige Tanks verschiedener Materialien und Füllstände mit einem standardisierten Fahr- und Abbremsverhalten untersucht (vgl. Abb. 3).

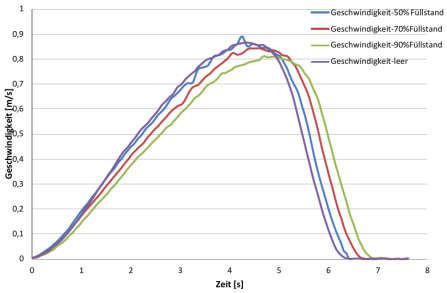

Abbildung 3: Das Fahrverhalten der untersuchten Plexiglas-Tanks bei verschiedenen Füllständen. Entnommen aus [7].

Mit Stillstand beginnt der Schwappvorgang (vgl. Abb. 4). Zunächst sind typische, füllstandsabhängige Fluidbewegungen zu beobachten. Später stellt sich ein rhythmisches Schwappen von einer Frequenz von ca. 1 Hz ein.

Der annähernd 2-dimensionale Schwappvorgang im Tank wird in der Bildsequenz in Abb. 5 als schwarz-weiss-Kontur dargestellt.

Danksagung

Die Autoren danken den fördernden Institutionen (s. Abb. 6).

Literatur

[1] Farhat, C. and Rallu, A. and Shankaran, S.: A Higher-Order Generalized Ghost Fluid Method for the Poor for the Three-Dimensional Two-Phase Flow Computation of Underwater Implosions, Elsevier 2008.

[2] Pantle, I.: Strömungsakustik auf der Basis akustischer Analogie mit LES und URANS, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 2002.

[3] Tam, C. K. W. and Webb, J. C.: Dispersion-Relation-Preserving Finite Difference Schemes for Computational Acoustics, J. Comp. Phys. 107 (1993), 262-281.

[4] Falquez, Pantle und Pritz GbR - Homepage, URL: `http://www.nuberisim.de/`

[5] Fachgebiet Strömungsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie - Homepage, URL: `http://www.fsm.kit.edu/`

[6] TIAutomotive, Niederlassung Rastatt - Homepage, URL: `http://www.tiautomotive.com/`

[7] Chehade, A.: Entwicklung eines Verfahrens zur Erstuntersuchung des Schwappverhaltens in Kraftstofftanks und erste akustische Analyse. Diplomarbeit Nr. 1827, Fachgebiet Strömungsmaschinen, Fakultät Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie, 2013.

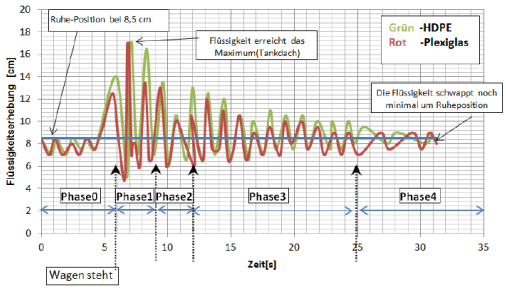

Abbildung 4: Beobachtung der Schwankungsbewegung der Phasengrenze zweier Rechtecktanks (unterschiedliche Materialien: reines Plexiglas und Plexiglas-HDPE (Seitenwände)). Tankabmessungen sind $B \times H \times T = 55\ \text{cm} \times 17\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$. Entnommen aus [7].

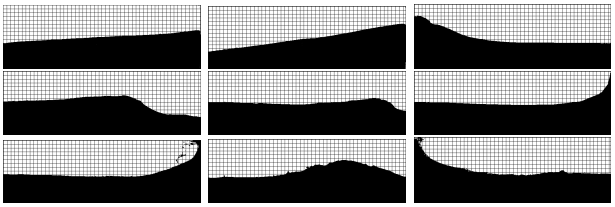

Abbildung 5: Schwappverhalten des Plexiglas-Tanks bei 50% Füllstand (Sequenz zeilenweise von links nach rechts). Entnommen aus [7].

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
EXIST Existenzgründungen aus der Wissenschaft
ESF Europäischer Sozialfonds für Deutschland
EUROPÄISCHE UNION

Abbildung 6: Förderung durch das EXIST-Gründerstipendium