

## Untersuchung des Wirkungsprinzips eines Blasenschleiers mit der „Volume of Fluid-Methode“

Henning Lohmann<sup>1</sup>, Kristof Heitmann<sup>1</sup>, Niklas Kühl<sup>1</sup>, Tristan Lippert<sup>1</sup>, Marcel Ruhnau<sup>1</sup>,  
Stephan Lippert<sup>1</sup> und Otto von Estorff<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg-Harburg, 21073 Hamburg  
E-Mail: mub@tuhh.de

### Einleitung

Die Energiewende - und somit ein Übergang von der Verbrennung fossiler Rohstoffe zu einer Nutzung regenerativer Energien - ist in Deutschland beschlossene Sache [1]. Hierbei spielt die Offshore-Windenergie eine bedeutende Rolle, da sie im Gegensatz zur landbasierten Windkraft eine wesentlich höhere Anzahl an Volllaststunden aufweisen kann.

Der Bau der Offshore-Windkraftanlagen birgt allerdings auch einige Nachteile, wie zum Beispiel die hohen Schalldruckpegel die bei der Errichtung der Fundamente entstehen und im Wasser über große Entfernungen transportiert werden. Die am häufigsten verwendete Methode ist hier die Impulsrammung, bei der die Gründungsstruktur durch Rammschläge in den Erdboden getrieben wird. Dabei können Einzelereignispegel (SEL) entstehen, die 200dB weit überschreiten.

Zum Schutz der in der Nordsee lebenden Meeressäuger, wie dem Schweinswal, hat die deutsche Bundesregierung Grenzwerte für die Schalldruckpegel erlassen. So darf in einer Entfernung von 750m vom Pfahl der SEL 160dB sowie der Spitzenpegel 190dB nicht überschreiten. Um diese Grenzwerte einzuhalten ist in den meisten Fällen ein Schallschutzsystem notwendig.

Am häufigsten wird hier der Blasenschleier verwendet. Um diesen zu errichten werden perforierte Schläuche auf dem Meeresboden kreisförmig um den Pfahl herum platziert. Anschließend wird von Kompressoren Luft in die Schläuche gepumpt, welche durch die Löcher austritt, zur Meeresoberfläche aufsteigt und eine Art Luftblasenwand um den Pfahl herum bildet. Durch diese Blasen wird der Schall gemindert. Zum Wirkungsprinzip der Schalldämmung durch Luftblasen im Wasser existieren bereits analytische Modelle mit welchen sich die Energiedissipation erklären und berechnen lässt. Eines dieser Modelle, welches sich jedoch aufgrund der Linearisierung auf die Betrachtung kleiner Luftblasen beschränkt, wird hier zunächst vorgestellt, um relevante Effekte und den Einfluss der Luftblasengröße aufzuzeigen. Um Effekte, wie zum Beispiel die Wechselwirkung zwischen den Blasen oder auch die Dissipationsmechanismen von größeren Luftblasen besser zu verstehen, liegt es nahe numerische Modelle zu verwenden, da in diesen im weiteren Verlauf auch beliebige Luftblasenkonstellationen im Hinblick auf Eigenschaften wie Größe, Form und Abständen der Luftblasen zueinander, untersucht werden können.

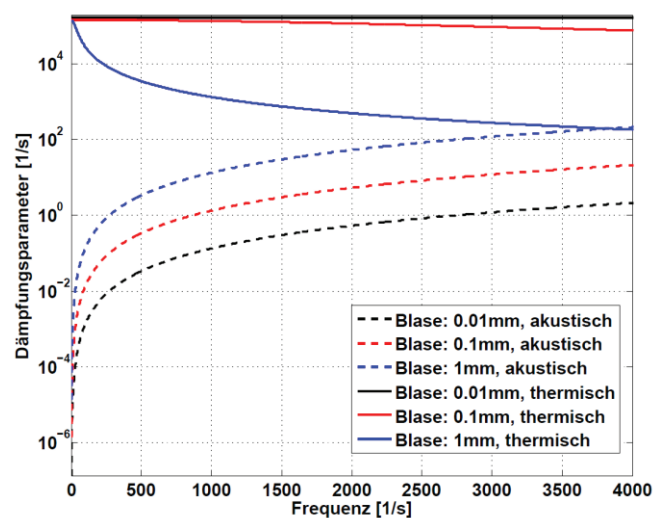
In dieser Arbeit wird ein numerisches Modell unter Verwendung der „Volume of Fluid“-Methode aufgebaut,

welche sich unter anderem sehr gut dazu eignet das Verhalten der Luft-Wasser-Grenzfläche darzustellen. Dabei wird auch auf Potentiale und Schwachstellen dieser Methode eingegangen.

### Modell von Prosperetti

In dem analytischen Modell von Andrea Prosperetti werden auf Grundlage der Impuls- und Massenerhaltung die Bewegungsgleichungen einer Luftblase aufgestellt. Dazu wird die Annahme von isentroper Bewegung im Fluid getroffen und es wird unter anderem die Symmetrie einer kugelförmigen Luftblase in Wasser ausgenutzt. Nach weiteren mathematischen Umformungen ergibt sich die Bewegungsgleichung einer Luftblase in Wasser, die schließlich, in die Form eines harmonischen Oszillators umgeschrieben, eine Bestimmung des Dämpfungsparameters zulässt. Dabei wird ersichtlich, dass sich der Parameter aus drei verschiedenen Anteilen zusammensetzt, welchen sich jeweils unterschiedliche Dissipationsmechanismen zuordnen lassen. Diese Anteile lassen sich als ein thermischer, ein akustischer und ein viskoser Anteil beschreiben [2].

In der Abbildung 1 sind der akustische und der thermische Anteil des Dämpfungsparameters für verschiedene Luftblasengrößen über der Frequenz dargestellt. Der viskose Anteil ist wesentlich kleiner und daher in dieser Abbildung nicht dargestellt.



**Abbildung 1:** Thermischer und akustischer Anteil des Dämpfungsparameters für verschiedene Luftblasengrößen in Abhängigkeit der Frequenz

Zunächst lässt sich hieraus schließen, dass in einer Luftblase, welche sich in Schwingung befindet, thermische Dissipationseffekte grundsätzlich auftreten können. Darüber

hinaus erkennt man, dass der thermische Anteil des Dämpfungsparameters mit steigender Luftblasengröße abnimmt, während der akustische Anteil des Dämpfungsparameters mit steigender Luftblasengröße zunimmt.

## Numerisches Modell

Das verwendete Modell basiert auf der Finite-Volumen-Methode, welche sich besonders aufgrund ihrer Energie- und Massenerhaltung eignet. Dabei wird das Berechnungsgebiet in eine bestimmte Anzahl an finiten Volumen unterteilt, über welche die Erhaltungsgleichungen integriert werden und somit die Berechnung von Flüssen über die Volumengrenzen ermöglicht wird. Hieraus resultieren die konservativen Eigenschaften des Verfahrens.

Die „Volume of Fluid“-Methode erweitert diese Methode in der Hinsicht, dass sie es möglich macht Simulationen mit mehreren Phasen durchzuführen. Dazu wird ein Parameter in die Berechnungen eingeführt, welcher den Phasenanteil innerhalb eines finiten Volumens beschreibt [3].

Da innerhalb der „Volume of Fluid“-Methode standardmäßig nur mit inkompressiblen Medien gerechnet wird können hiermit in der Regel keine Druckausbreitungssphänomene, wie sie hier betrachtet werden sollen, simuliert werden. Daher wurde innerhalb des Modells die Dichte in Abhängigkeit des Druckes vorgegeben:

$$\rho = \frac{\rho_{ref}}{1 - \frac{p - p_{ref}}{K}}, \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (1)$$

mit der Dichte  $\rho$ , der Referenzdichte  $\rho_{ref}$ , dem Druck  $p$ , dem Referenzdruck  $p_{ref}$  sowie dem Kompressionsmodul  $K$ . Die Referenzdichte und der dazugehörige Referenzdruck werden vorgegeben und diese Abhängigkeit wird, gemäß Formel (1), dem Fluid zugewiesen.

Ebenso erfolgt eine Vorgabe der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des sich ändernden Druckes bzw. der Dichte.

Das verwendete würfelförmige Netz aus dreidimensionalen Elementen besteht aus einer verfeinerten Diskretisierung im Innenbereich in welchem sich die Luftblase befindet und einer nach außen hin gröber werdenden Diskretisierung. Am Rand des verfeinerten Innenbereichs wird der Druckimpuls bzw. die harmonische Anregung durch die Vorgabe des Druckes erzeugt. Da es in diesem Modell nicht möglich war eine nicht reflektierende Randbedingung zu implementieren, musste das Berechnungsgebiet soweit vergrößert werden, dass auftretende Reflektionen die Messungen um die Luftblase herum nicht beeinflussen. Die Amplitude des Druckes wird darüber hinaus durch die auftretende numerische Dissipation aufgrund der gröberen Diskretisierung abgeschwächt. Die generelle Struktur des Netzes ist in Abbildung 2 dargestellt.

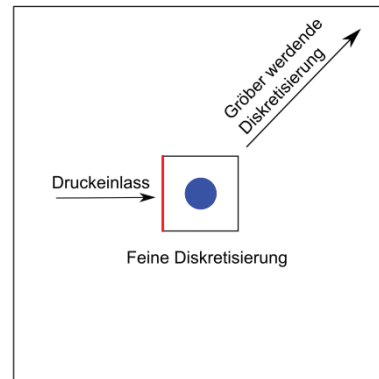


Abbildung 2: Struktur des verwendeten Netzes

## Ergebnisse

Durch Messungen des Druckes vor und hinter der Blase, lässt sich zeigen, dass dieser hinter der Blase geringer ist, was zunächst grundsätzlich dem Wirkprinzip eines Blasenschleiers entspricht. Des Weiteren lässt sich am Druckverlauf im Rechengebiet erkennen, dass der Druck zu einem großen Teil an der Luftblase reflektiert wird. Die Druckverteilung ist dazu in der Abbildung 3 dargestellt.

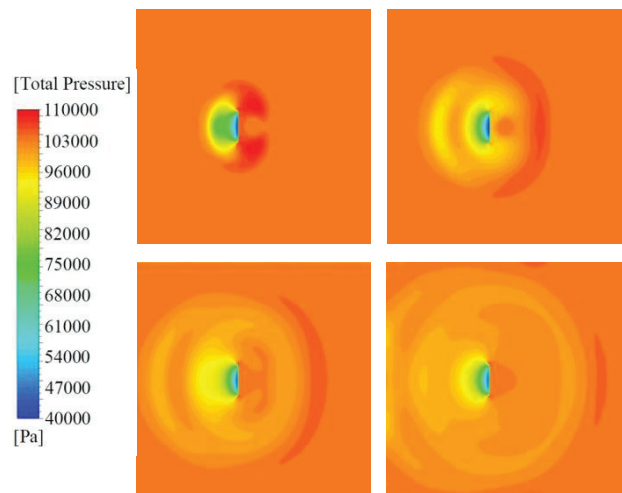
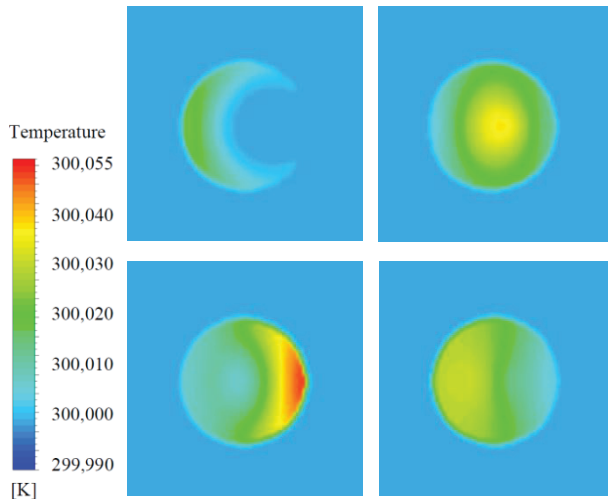


Abbildung 3: Druckverteilung im Rechengebiet zu den Zeitpunkten:  $1,25 \cdot 10^{-6}$  [s] (oben links),  $2,5 \cdot 10^{-6}$  [s] (oben rechts),  $3,75 \cdot 10^{-6}$  [s] (unten links),  $5 \cdot 10^{-6}$  [s] (unten rechts)

Beim Betrachten der Temperatur in der Luftblase lässt sich erkennen, dass diese zunächst aufgrund des sich ändernden Druckes ansteigt. Nachdem die Druckwelle die Blase durchlaufen hat, stellt sich eine konstante, leicht erhöhte Temperatur innerhalb der Luftblase ein. Aus diesem Temperaturanstieg lässt sich nun die dissipierte Energie bzw. die dissipierte Intensität bestimmen.

Die Temperaturverteilung in der Luftblase ist auf Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Temperatur in der Luftblase zu den Zeitpunkten:  $1,25 \cdot 10^{-6}$  [s] (oben links),  $2,5 \cdot 10^{-6}$  [s] (oben rechts),  $3,75 \cdot 10^{-6}$  [s] (unten links),  $5 \cdot 10^{-6}$  [s] (unten rechts)

Die einfallende Intensität,  $I$ , welche insgesamt auf die Luftblase trifft, lässt sich unterteilen in drei verschiedene Anteile: Einen dissipierten Anteil, einen reflektierten Anteil, sowie einen transmittierten Anteil. Der dissipierte Anteil wird über den Temperaturanstieg in der Luftblase bestimmt. Der transmittierte und der einfallende Anteil werden durch Berechnungen des Druckes über einer Fläche, entsprechend der Querschnittsfläche der Luftblase, vor und hinter der Luftblase bestimmt. Der reflektierte Anteil ist schwer durch die Messung des Druckes zu bestimmen, da er in der Regel von der eintreffenden Druckwelle überlagert wird und daher kaum von dieser zu separieren ist. Daher wurde hier zunächst angenommen, dass der nach der Bestimmung von transmittiertem und dissipiertem Anteil verbleibende Anteil der Intensität zur Reflektion zuzuordnen ist. Die verschiedenen Anteile lassen sich nun als Faktoren bezüglich der einfallenden Intensität,  $I$ , ausdrücken:

$$I = \alpha_r I + \alpha_d I + \alpha_t I \quad \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (2)$$

In der nachfolgenden Tabelle sind die entsprechenden Koeffizienten, die sich aus den Messungen ergeben, dargestellt:

**Tabelle 1:** Faktoren für verschiedene Luftblasendurchmesser

| Durchmesser der Blase | Reflektion $\alpha_r$ | Dissipation $\alpha_d$ | Transmission $\alpha_t$ |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 1mm                   | 0.0903                | 0.8906                 | 0.0189                  |
| 2mm                   | 0.1327                | 0.8485                 | 0.0188                  |
| 3mm                   | 0.2342                | 0.6737                 | 0.0925                  |

### Zusammenfassung

Es fällt auf, dass bei kleinen Luftblasen scheinbar ein sehr großer Anteil der Energie in Wärme umgewandelt wird. Dies könnte auf Fehler in der Berechnung der Temperatur zurückzuführen sein, da diese nur auf Grundlage der Temperatur eines einzelnen Messpunktes im Zentrum der Blase abgeschätzt wurde. Des Weiteren könnten auch Fehler bei der Messung der Intensität vor und hinter der Blase dazu geführt haben, dass der dissipierte Anteil im Verhältnis zu hoch ausfällt.

Die Tendenz der sinkenden dissipierten Energie mit größer werdenden Luftblasen stimmt jedoch mit den analytischen Berechnungen aus dem Modell von Andrea Prosperetti überein.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Nutzbarkeit dieses Modells haben die Rechenzeiten. Diese betragen für ein Modell einer einzelnen Luftblase mit einem Durchmesser von 1mm, gerechnet auf 48 Prozessorkernen, ca. 40 Stunden. Im Bezug zu Rechenzeiten eines vergleichbaren Modells auf Basis der Finite-Elemente-Methode erscheinen diese Rechenzeiten relativ lang. Allerdings ist die Finite-Volumen-Methode wesentlich besser geeignet strömungsmechanische Probleme darzustellen, was in diesem Fall beispielsweise Aufstiegsgeschwindigkeiten und Aufstiegsformen von Luftblasen betrifft. Zur Berechnung des Blasenauftiegs sollten hier allerdings andere Zeitschrittgrößen verwendet werden. Bezüglich der Druckausbreitung sind Verminderungen der Rechenzeit dahingehend zu erwarten, dass das Rechnen mit niedrigeren Frequenzen in einer Größenordnung des Rammschalls, sowohl eine gröbere räumliche als auch eine gröbere zeitliche Diskretisierung erlaubt. In diesem Fall ist es auch vorstellbar, mit diesem Modell unterschiedliche Anordnungen aus wenigen Luftblasen zu untersuchen, um die Wechselwirkungen zwischen den Luftblasen genauer zu verstehen. Diese Untersuchung hat hierzu gezeigt, dass die Darstellung von thermischen Effekten in den Luftblasen möglich ist und die Ergebnisse tendenziell mit Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmen.

### Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. (2011)
- [2] Prosperetti, A.: Bubble phenomena in sound fields: part one. *Ultrasonics* 22: 69-77. (March 1984)
- [3] Hirt C.W. und Nichols B.D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of computational physics*, 39: 201-225. (1981)