Globale Modellierung eines Offshore-Blasenschleiers

Tobias Bohne¹, Tanja Grießmann² und Raimund Rolfes³

Motivation

Die mit dem Rammen von Monopiles verbundenen Schallemissionen stellen eine potentielle Gefahr für die Meeresumwelt dar. Ausführliche Messungen zeigen, dass die zum Schutz vorgesehenen Grenzpegel immer wieder deutlich überschritten werden. Effektiven Schallminderungsmaßnahmen kommt somit eine wichtige Rolle bei der ökologischen Umsetzung der Energiewende zu. Eine häufig eingesetzte Maßnahmen ist, alleine oder in Kombination mit weiteren Systemen, der Blasenschleier. Die Effekte und Wirkmechanismen des Blasenschleiers sind bis heute nicht umfassend bekannt. Ziel soll es daher langfristig sein anhand eines globalen Modells des Blasenschleiers, den Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen und Systemkonfigurationen auf die Schallminderung zu untersuchen.

Stand der Forschung

Um den zu rammenden Pfahl wird in direkter Nähe (Kleiner Blasenschleier) oder in größerer Entfernung ein Düsenschlauch auf dem Meeresgrund verlegt. Im Anschluss wird Luft in den Schlauch gepresst, die durch die Düsen austritt und einen Blasenschleier um den Pfahl bildet. Verschiedene akustische Messungen, beispielsweise die von Grießmann et al. (2009) und Rustemeier et al. (2010), zeigen eine frequenzabhängige schallmindernde Wirkung des Blasenschleiers.

Um ein besseres Verständnis der wirkenden Effekte zu erlangen, hatten vorangegangene Arbeiten das Ziel ein numerisches Detail-Modell des Blasenschleiers zu entwickeln. Im ersten Schritt wurde das Verhalten einer Einzelblase unter einer Druckwelle untersucht und dieses mit Angaben aus der Literatur verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die aus der Simulation resultierende Eigenfrequenz der Blase mit der nach Minnaert (1933) bestimmten Blaseneigenfrequenz übereinstimmte. [4]

Im nächsten Schritt wurde ein Ausschnitt des Blasenschleiers betrachtet. Bei einer gemessenen Blasengrößenverteilung von Rustemeier und Rolfes (2014) und einem Luftvolumengehalt von einem Prozent wurde das Verhalten des Blasenschleiers unter einem Druckimpuls mit der Periodendauer von 1 ms untersucht. In der Abbildung 1 ist der resultierende Druck im Blasenschleier kurz vor und während des Impulsdurchgangs dargestellt. Eine genauere Betrachtung zeigte, dass Blasen in einem Blasenschleier unter einem Impuls in ihrer Eigenfrequenz schwingen. Die Schallminderung wurde für niedrige Frequenzen auf den Gasgehalt im Wasser und für höhere

Frequenzen auf die Blasenschwingung zurückgeführt. [6]

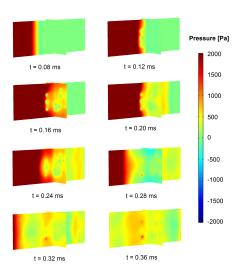


Abbildung 1: Darstellung eines Ausschnitts des Blasenschleiers im Zeitbereich während eines Impulsdurchgangs. Der Impuls weist dabei eine Periodendauer von 1 ms auf. Der Luftvolumengehalt des Blasenschleiers beträgt ein Prozent. Die Blasengrößenverteilung basiert auf Messungen von Rustemeier und Rolfes (2014). (Abbildung: [6])

Die Schallminderung eines Blasenschleiers wird dem zur Folge insbesondere durch die Eigenfrequenz der Luftblasen und dem Gasgehalt im Wasser bestimmt. Beide Systemparameter sind direkt abhängig vom vorherrschenden Umgebungsdruck und ändern sich über die Wassertiefe. Im Mittelpunkt dieser Ausarbeitung steht daher die integrale Betrachtung der Schallminderung eines Blasenschleiers, die neben lokalen Effekten auch die Schallleitung über mögliche obere Bodenschichten mitberücksichtigt. Dazu wird ein globales Modell eines Offshore-Blasenschleiers vorgestellt und im Anschluss mit Offshore-Messungen verglichen.

Globale Modellierung eines großen Blasenschleiers

In der Abbildung 2 ist das globale Modell des Blasenschleiers qualitativ dargestellt. Es setzt sich zusammen aus dem Wasserkörper, dem Blasenschleier und einem mehrschichtigen Boden. Auf der linken Seite wird eine unter einem Winkel einfallende Schallwelle definiert. Zur Ermittlung der Schallminderung werden hinter dem Blasenschleier Feldgrößen an drei übereinander liegenden Messpunkten bestimmt.

Das globale Modell des Blasenschleiers ist in einem kom-

 $^{^{1}\} Institut\ f\"{u}r\ Statik\ und\ Dynamik,\ 30167\ Hannover,\ Deutschland,\ Email:\ t.bohne@isd.uni-hannover.de$

 $^{^2\} Institut\ f\"ur\ Statik\ und\ Dynamik,\ 30167\ Hannover,\ Deutschland,\ Email:\ t.griessmann@isd.uni-hannover.de$

³ Institut für Statik und Dynamik, 30167 Hannover, Deutschland, Email: r.rolfes@isd.uni-hannover.de

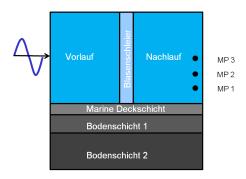


Abbildung 2: Schematische Darstellung des globalen Blasenschleier-Modells

merziellen FE-Solver implementiert und weitestgehend parametrisiert, sodass es über ein externes Skript gesteuert werden kann. Die Akustik wird über die Helmholtz-Gleichung im zweidimensionalen Raum abgebildet. Die Materialdaten werden vor der Berechnung über externe Funktionen in das Modell eingebunden.

Blasenschleier-Funktion

Die externe Blasenschleier-Funktion setzt sich zusammen aus einer Strömungs- und einer Blasenakustikkomponente. Erstere bestimmt über den Luftmassenstrom des Kompressors für verschiedene Wassertiefen den Gasgehalt im Wasser, unter der Annahme, dass die Blasen mit einer Geschwindigkeit von $0,25\ ms^{-1}$ aufsteigen. Ausgehend vom Gasgehalt und einer zu Grunde liegenden Gauß-Verteilung wird die lokale Blasenanzahl bestimmt. Die resultierende Blasengrössenverteilung wird an die Akustikkomponente übergeben, die basierend auf dem Modell nach Commander und Prosperetti (1989) die lokale Schallgeschwindigkeit des Blasenschleiers berechnet

Boden-Funktion

Der Boden wird im Modell vereinfacht als Fluid angenommen. Die Geschwindigkeit der Kompressionswellen und die Dichte werden über das Bodenmodell nach Fricke et al. (2014) bestimmt.

Die Bestimmung der Schallminderung (kurz: TL) erfolgt in zwei Schritten. Um die Rammung ohne Blasenschleier abzubilden, wird der Gasgehalt im Wasser zu Null gesetzt und die Referenzintensität I_0 bestimmt. Im nächsten Schritt wird der Gasgehalt entsprechend dem vom Kompressor geförderten Massenstrom definiert. Die aus der Simulation resultierende Intensität I wird zur Referenz ins Verhältnis gesetzt.

$$TL = 10\log(I/I_0)$$
 [dB] (1)

Ergebnisse

Im Folgenden soll das Modell anhand von Offshore-Messungen validiert werden. Die abgeschlossenen Messungen von Diederichs et al. (2014) bieten sich hier an. Die Messungen wurden im Windpark Borkum West 2 45 km vor Borkum durchgeführt. Die Wassertiefe beträgt in diesem Bereich der Nordsee 27 m bis 33 m. In den meisten Einsätzen wurde der Düsenschlauch ringförmig mit einem Mindestabstand von >70m bei einer Schlauchlänge von 560 m um den Pfahl gelegt. Die Messungen wurden in Entfernungen von 750 m und 1500 m zum Pfahl in einer Höhe zwischen 2 m bis 4 m über Grund durchgeführt.

In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Eingangsgrößen des Modells zusammengefasst. Ausgehend von der Schlauchlänge und einer ringförmigen Verlegung wird der Abstand vom Pfahl zum Blasenschleier im Modell zu 90 m bestimmt. Die Breite des Blasenschleiers und die Blasengrößen wurden während der Messungen nicht ermittelt. Die Breite wird zu 2 m gesetzt und die Blasengrößenverteilung entsprechend den Messungen von Rustemeier und Rolfes (2014) gewählt.

Tabelle 1: Eingangsgrößen des globalen Modells für den Offshore Windpark Borkum West 2. (Die Werte für die Spalte "Borkum West 2": [9])

Parameter	Borkum West 2	Modell
Wassertiefe	27 m - 33 m	30 m
Abstand	>70 m	90 m
Pfahl-B.S.		
Boden	keine Angabe	D1 nach [8]
Druckluft-	0,32	0,32
menge	$\mathrm{m}^{3}\mathrm{min}^{-1}\mathrm{m}^{-1}$	$\mathrm{m}^{3}\mathrm{min}^{-1}\mathrm{m}^{-1}$
Breite	keine Angabe	2 m
Blasenschleier		
Blasengröße	keine Angabe	μ = 4,2 mm,
		σ = 2,0 mm

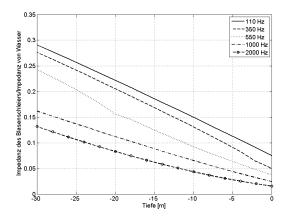


Abbildung 3: Darstellung des Impedanzverhältnisses vom Blasenschleier zu Wasser (Realteil) über die Wassertiefe für einen Luftvolumenstrom von $0.32~{\rm m^3min^{-1}m^{-1}}$

In der Abbildung 3 ist die Impedanz des Blasenschleiers zu der des Wassers für verschiedene Frequenzen ins Verhältnis gesetzt. Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die Impedanz des Blasenschleiers kleiner als die des Wassers ist und mit der Wassertiefe zunimmt. Die Zunahme ist insbesondere bei niedrigeren Frequenzen zu beobachten. Wird für 110 Hz an der Wasseroberfläche

noch ein Impedanzverhältnis von 7 Prozent bestimmt, steigt dieses in einer Wassertiefe von 30 m bis auf 30 Prozent an. Die schallmindernde Wirkung des Blasenschleiers ist somit kurz unter der Wasseroberfläche am größten und nimmt in größeren Wassertiefen ab. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass mit zunehmenden statischen Druck die Luft im Wasser immer weiter komprimiert wird und somit der Gasgehalt sinkt. Umgekehrt weisen Blasen gleichen Radius in größeren Wassertiefen eine höhere Eigenfrequenz auf (vgl. [3]) und verringern somit den Anteil der Blasenschwingung an der Schallminderung .

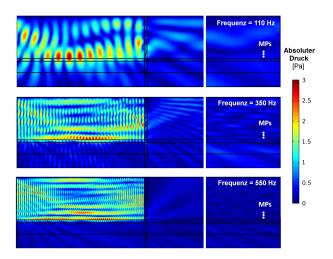


Abbildung 4: Linker Ausschnitt: Aus dem globalen Modell resultierende absolute Druckverteilung für Borkum West 2 für die Frequenzen 110 Hz, 350 Hz und 550 Hz. Rechter Ausschnitt: Zusätzlich zu der Druckverteilung werden qualitativ die drei Punkte zur Ausgabe des Schalldrucks, der Schallschnelle und der Intensität (MPs) dargestellt.

Für die Frequenzen 110 Hz, 350 Hz und 550 Hz ist der absolute Druck in der Abbildung 4 dargestellt. Aus Darstellungsgründen wird ein Teil des Berechnungsraums hinter dem Blasenschleier nicht betrachtet. Es werden somit für jede Frequenz zwei Ausschnitte gezeigt. Die Schallwelle tritt im linken Ausschnitt am linken Rand unter einem Winkel von 18 Grad in den Berechnungsraum ein. Im unteren Bereich des Wasserkörpers und in der oberen Bodenschicht bilden sich Knoten erhöhten Drucks aus. Diese verschieben sich nach etwa 60 m wieder nach oben in den Wasserkörper - die Schallwelle wird am Boden reflektiert. Im Blasenschleier bilden sich im unteren Bereich lokal vertikale Wellenfronten aus. Im Wasserkörper bedingen diese horizontale Streifen höheren Drucks.

Im Modell werden entsprechend der Abbildung 4, rechter Ausschnitt, an drei Punkten (MPs) in den Höhen: 1,0 m, 2,5 m und 5,0 m über Grund die Werte für die Intensität, Schalldruck und die Schallschnelle ermittelt. Auf Grund beschränkter Rechenleistung konnte der Abstand zum Pfahl mit 232 m nicht entsprechend der Offshore-Messungen gewählt werden.

In der Abbildung 5 werden das von Diederichs et al. (2014) gemessene Differenzspektrum für eine Luftmenge von $0.32~\rm m^3 min^{-1} m^{-1}$ mit den Ergebnissen des globa-

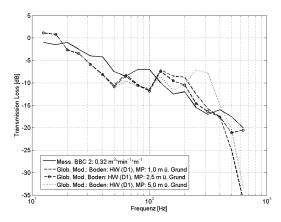


Abbildung 5: Vergleich der aus dem globalen Modell resultierenden Differenzspektren mit der Offshore-Messungen [9] für eine Luftmenge von $0.32 \text{ m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-1}$

len Modells verglichen. Im Frequenzbereich zwischen 10 Hz bis 100 Hz überschätzt das Modell noch um <4dB die Schallminderung. Im Bereich zwischen 100 Hz und 400 Hz wird die Schallminderung durch das Modell um <4dB unterschätzt. Ab 400 Hz steigt die aus dem Modell resultierende Schallminderung für die Punkte 1 m und 5 m über Grund deutlich an. Das Differenzspektrum für den Punkt 2,5 m über Grund zeigt für alle betrachteten Frequenzen eine hohe Übereinstimmung mit den Offshore-Messungen.

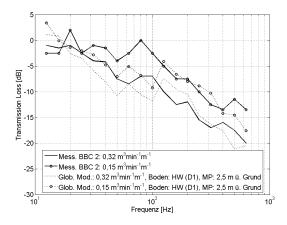


Abbildung 6: Vergleich der aus dem globalen Modell resultierenden Differenzspektren für den Punkt 2,5 m über Grund mit den Offshore-Messungen [9] für die Luftmengen: $0,32 \,\mathrm{m^3min^{-1}m^{-1}}$ und $0,15 \,\mathrm{m^3min^{-1}m^{-1}}$

In der Abbildung 6 sind die Offshore-Messungen für die beiden Volumenströme von 0,32 m³min⁻¹m⁻¹ und 0,15 m³min⁻¹m⁻¹ mit den entsprechenden Simulationsergebnissen für den Punkt 2,5 m über Grund gegenübergestellt. Die Reduzierung der Luftmenge um die Hälfte hat bei den Messungen und der Simulation eine Abnahme um 4 bis 5 dB zur Folge. Insbesondere im für Rammschall relevanten Frequenzbereich zwischen 100 Hz bis 600 Hz ist eine hohe Übereinstimmung zwischen den Mess- und den Simulationsergebnissen zu beobachten.

Diskussion

Der Vergleich mit Offshore Messungen - wie in diesem Fall bei Borkum West 2 - ist auf Grund fehlender Eingangsgrößen (die Blasengrößenverteilung und der Luftvolumengehalt wurden während des Versuchs nicht gemessen; Bodendaten lagen nicht vor) nur eingeschränkt möglich.

Zur Bestimmung des Luftvolumengehalts wird im Modell davon ausgegangen, dass die Luft im Wasser mit einer Geschwindigkeit $0,25~ms^{-1}$ aufsteigt. Diese Annahme basiert auf Messungen der Aufstiegsgeschwindigkeit von großen unverschmutzten Einzelblasen (vgl. hierzu beispielsweise: [10]) und trifft somit für Blasenschleiern mit großen Abständen zwischen den Blasen zu. Mit zunehmender Blasendichte muss eine durch die Blasen induzierte Strömung mitberücksichtigt werden.

In den Modellergebnissen konnte kein großer Einfluss der marinen Deckschicht auf die Schallminderung beobachtet werden. Dies könnte unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass die Schallgeschwindigkeit der oberen Schicht mit 1730 ms^{-1} vergleichsweise hoch ist. Bei einer Reduzierung der Schallgeschwindigkeit zeigen hier nicht dokumentierte Untersuchungen einen größeren Einfluss des Bodens auf die Schallminderung. Insbesondere für höhere Frequenzen resultiert eine im Vergleich zu den Offshore-Messungen zu niedrige Schallminderung.

Fazit

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurde ein globales Modell zur Bestimmung der Schallminderung bei Offshore-Blasenschleier vorgestellt. Neben dem Wasserkörper mit Blasenschleier werden im Modell auch die oberen Bodenschichten berücksichtigt. An drei Frequenzen wurde gezeigt, dass insbesondere im unteren Bereich des Blasenschleiers die Schalltransmission stattfindet. Dies kann insbesondere auf den geringeren Luftvolumengehalt und der erhöhten Blaseneigenfrequenz in größeren Wassertiefen zurückgeführt werden. Der Vergleich der Modellergebnisse mit Messungen aus dem Offshore Windpark Borkum West 2 zeigt, dass das globale Blasenschleier Modell die frequenzabhängige Schallminderung und die Abhängigkeit von der eingesetzten Luftmenge abbildet. Es wurde der Einfluss der Blasenaufstiegsgeschwindigkeit und des Bodens diskutiert.

Danksagung

Die Forschungsaktivitäten der Leibniz Universität Hannover im Rahmen des Projektes BORA werden zusammen mit Projektpartnern an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und der Technischen Universität Hamburg-Harburg durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ 0325421) gefördert. Die Autoren möchten sich für diese Unterstützung beim Zuwendungsgeber und beim Projektträger Jülich herzlich bedanken. Weitere Informationen können der BORA-Projekthomepage www.bora.mub.tuhh.de entnommen werden.

Literatur

- [1] Grießmann, T., Rustemeier, J., Betke, K., Gabriel, J., Neumann, T., Nehls, G., Brandt, M., Diederichs A. und Bachmann, J.: Erforschung und Anwendung von Schallminimierungsmaßnahmen beim Rammen des FINO3-Monopiles ("Schall FINO3"). Abschlussbericht (2009)
- [2] Rustemeier J., Grießmann, T., Betke, K., Gabriel, J., Neumann, T. und Küchenmeister, M.: Erforschung der Schallminderungsmaßnahme "Gestufter Blasenschleier (Little Bubble Curtain)" im Testfeld alpha ventus ("Schall alpha ventus"). Abschlussbericht (2010)
- [3] Minnaert M.: XVI. On musical air-bubbles and the sounds of running water. Philosophical Magazine Series 7, 16:104, (1933) 235-248
- [4] Bohne, T., Díaz-Cereceda, C., Rustemeier, J., Grießmann, T. und Rolfes, R.: Numerical modelling of a bubble curtain. Proceedings of 2nd Underwater Acoustics Conference and Exhibition (2014), 209-214
- [5] Rustemeier, J. und Rolfes, R.: Persönliche Kommunikation (2014)
- [6] Bohne, T., Díaz-Cereceda, C. und Rolfes, R.: NU-MERICAL MODELLING OF BUBBLE CURTAINS. Proceedings of International Wind Engineering Conference (2014)
- [7] Commander, K. W. und Prosperetti, A.: Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 85 (2) (1989), 732-746
- [8] Fricke, M., Neddermann, B., Lübben, A. und Gabriel, J.: Realistische Hydroschallszenarien auf der Basis von Prognosemodellen und Monitoring für den Bau von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (HyproWind). Abschlussbericht (2014)
- [9] Diederichs, A., Pehlke, H., Nehls, G., Bellmann, M., Gerke, P., Oldeland, J., Grunau, C., Witte, S. und Rose, A.: Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. Abschlussbericht (2014)
- [10] Leifer, I., Patro, R. K. und Bowyer, P.: A Study on the Temperature Variation of Rise Velocity for Large Clean Bubbles. Journal of atmospheric and oceanic technology Vol. 17 (1999), 1392-1402