

## Nachbildung von Druckfeldern frei fahrender Schiffe mittels numerischer Simulation und experimenteller Analyse

U. Lichtenstein, K. Breddermann, M. Paschen

Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik  
Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

### Motivation

Auch in der heutigen Zeit stellen Seeminen (hier insbesondere Grundminen) eine Gefahr für die Schifffahrt dar. Methoden der Seeminenabwehr sind neben der Minenjagd auch das Fernräumen. Fernzündminen reagieren auf die von Schiffen verursachten Änderungen der Umwelt in Folge eigener physikalischer Felder (Schiffssignaturen). In der Regel sind das akustische Änderungen, magnetische Änderungen oder aber auch Änderungen des Druckes. Gemeinsam bilden diese Felder die Signatur eines Schiffes, die es für Abwehrmaßnahmen/ Räummaßnahmen im Idealfall nachzubilden gilt. Während die akustische Signatur u.a. durch Geräuscherzeuger und die magnetische Signatur u.a. durch Hohlstäbe (magnetische Kesselkörper) simuliert werden können, existiert weltweit kein Räumgerät welches die Drucksignatur des Schiffes simulieren kann.

Ein viel versprechender Ansatz zur Simulation von Drucksignaturen besteht im Schleppen von Unterwasserkörpern. Daher ist unsere wissenschaftliche Zielstellung die Konzeptentwicklung eines Unterwasserschleppkörpers bzw. eines Schleppkörper-Arrays zur Erzeugung von definierten Drucksignaturen, die zum Auslösen des Druckkanals ausreichen bzw. die dem hydrodynamischen Druckfeld eines fahrenden Schiffes entsprechen sollen.

### Stand der Forschung und Vorarbeiten

Für den Zündmechanismus von Druckminen ist der hydrostatische Druck am Ort der Mine auf dem Meeresgrund, beziehungsweise dessen zeitliche Änderung, die entscheidende Kenngröße. Für eine stationäre, inkompressible, reibungsfreie Strömung lautet die Bernoulli Gleichung für den Gesamtdruck  $p_g$  (siehe z. B. Truckenbrodt)

$$p_0 + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho}{2} v^2 = p_g = const \quad [1]$$

Hierbei ist  $\rho$  die Dichte des Wassers,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $h$  die Tiefe und  $p_0$  der atmosphärische Druck. Des Weiteren wird der Term  $\frac{\rho}{2} v^2$  als der kinetische Druck oder Geschwindigkeitsdruck und  $\rho \cdot g \cdot h$  der aus der Wassertiefe resultierende Höhendruck bezeichnet. Dieser bildet zusammen mit dem atmosphärischen Druck den hydrostatischen Druck.

Das Druckfeld eines fahrenden Schiffes bewirkt die Formung eines spezifischen Wellenbildes. Für den Zündentscheid einer Druckmine ist dabei das Primärwellenbild entscheidend, das sich mit dem Schiff mitbewegt. Abbildung 1 zeigt ein deutlich ausgebildetes Primärwellensystem

am Beispiel eines fahrenden Schleppers. Dieses besteht aus einer Bug- und einer Heckwelle und einer Wasserspiegelabsenkung dazwischen.



Abbildung 1: Primärwellenbild eines fahrenden Schiffes

Daraus ergibt sich also eine örtliche Änderung der Wasserspiegelhöhe  $h$  in Gleichung [1], und damit des Drucks an diesem Ort (siehe Abb. 1). Die Abbildung macht außerdem deutlich, dass die gewünschte simulierte Druckänderung eine Verringerung des Drucks am Ort einer Mine ist. Wobei zu einem positiven Zündentscheid des Druckzünders die bloße Verringerung des hydrostatischen Drucks nicht reicht. Vielmehr muss diese über eine gewisse Zeitspanne anhalten.

In der ersten Phase des vorliegenden Projekts wurden sowohl vorausgehende Arbeiten zu dem Thema als auch offengelegte Patente zu der genauen oder ähnlichen Problemstellung studiert. Das Ziel dabei war die Findung eines praktischen Ansatzes für die Entwicklung eines neuen Konzepts im Sinne des vorliegenden Projektes.

Die zur Recherche herangezogenen Arbeiten und Patente zeichnen ein charakteristisches Bild: Das Erreichen einer gewissen Absenkung des Gesamtdrucks ist in der Regel nicht das Problem. Die eigentliche Herausforderung besteht darin, diese Reduzierung für eine ausreichende Zeitdauer aufrecht zu erhalten. Dabei gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze. Zum einen kann eine Druckreduzierung nach Gleichung [1] durch eine Beschleunigung des Fluids erreicht werden. Dies soll oft durch den Einsatz von Verdrängungskörpern erfolgen. So zum Beispiel bei Peters und Schneider. Dabei müsste zum Erreichen der nötigen Zeitdauer, der Körper jedoch solche Ausmaße haben, dass eine praktische Umsetzung als zu aufwendig ausfällt. Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Übergeschwindigkeiten ist der Einsatz von Wirbeln, wie es beispielsweise von Klug beschrieben wurde.

Eine weitere Möglichkeit wurde von Actkinson in der Arbeit „Minesweeping for pressure actuated mines by air injection into a water column“ vorgestellt. Hierbei wird Luft in Form kleiner Blasen in die Wassersäule injiziert, was zu einer lokalen Verringerung der Dichte und damit zur Reduzierung des hydrostatischen Drucks führt. Das Konzept wurde jedoch auf Grund von Nichterfüllung der Rahmenvoraussetzung nicht weiter verfolgt. Da die Voraussetzungen für das vorliegende Projekt anders ausfallen, wurde das Prinzip genauer auf seine Eignung zur Erfüllung der Zielparame-ter untersucht. Es ist das erste Konzept, dass innerhalb dieses Projektes auch experimentell untersucht wurde.

### Theoretische Betrachtung des Konzepts der Luftinjektion

Zur Vorhersage der zu erwartenden Druckreduzierung kann man nach Actkinson das Volumenverhältnis von Luft und Wasser in der Wassersäule heranziehen.

Dieser Theorie liegen folgende Annahmen zu Grunde. Zum einen entspricht der Austrittsdruck der Luftblasen dem hydrostatischen Druck am Blasenerezeuger. Damit entspricht der in der Zuleitung gemessene Luftvolumenstrom auch dem, der durch den Blasenerezeuger in das Wasser gelangt. Weiterhin wurde hier angenommen, dass sich die Luftblasen auf dem Weg an die Wasseroberfläche nicht ausdehnen und dass die Schleppgeschwindigkeit des Blasenerezeugers keinen Einfluss auf die Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen hat. Dies könnte durch vorzeitiges Ablösen der Blasen am Blasen einlass durch die Anströmung geschehen. Die Theorie zieht nur den hydrostatischen Druck  $p_h$  in Betracht.

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h + p_0 \quad [2]$$

Demnach ergibt sich die Druckdifferenz aus dem hydrostatischen Druck der ungestörten Wassersäule abzüglich des hydrostatischen Drucks der Wassersäule mit Luftanteil.

$$\Delta p = \rho_0 \cdot g \cdot h - \rho_g \cdot g \cdot h \quad [3]$$

Hierbei ist  $\rho_0$  die Dichte des Wassers und  $\rho_g$  die lokale Dichte der Wassersäule mit Luftanteil. Eine schematische Darstellung des Konzepts ist in Abbildung 2 zu sehen. Hier sind auch weitere wichtige Eingangsgrößen dargestellt. Diese sind der Luftvolumenstrom  $Q$ , die Schleppgeschwindigkeit  $v$  und die Länge  $L$  des Blasenerezeugers, die Tiefe  $h$ , in der der Blasenerezeuger geschleppt wird, die aus der Schleppbewegung und der Aufstiegsbewegung der Blasen resultierende Höhe der Blasensäule  $d$  und die Zeit  $T$ , die die Blasen zum Aufstieg an die Wasseroberfläche benötigen.

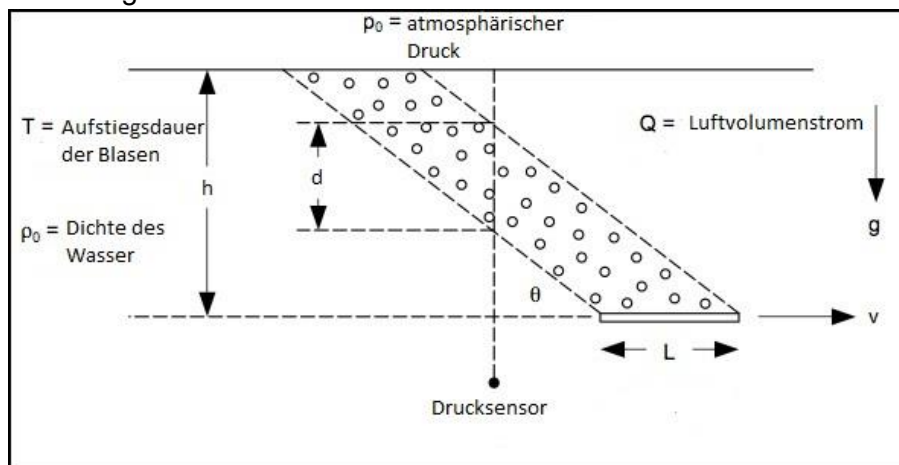


Abbildung 2: Prinzipskizze nach Actkinson

Eine weitere Dimension ist noch die Breite  $B$  des Blasenerezeugers. Mit Hilfe dieser Größen lässt sich der Volumenanteil der Luft im Wasser bestimmen.

Das Gesamtvolumen der Blasensäule  $V_B$  ergibt sich aus der Grundfläche des Blasenerezeugers multipliziert mit der Wassertiefe, in der er geschleppt wird, also  $V_B = L \cdot B \cdot h$ . Das Volumen der durch den Schleppvorgang geneigten Blasensäule ist identisch. Daher ist das in der Blasensäule enthaltene Luftvolumen  $V_L$  das Produkt aus dem Luftvolumenstrom multipliziert mit der Zeit, die die Blasen zum Aufstieg an die Wasseroberfläche benötigen, also  $V_L = Q \cdot T$ .

Das Volumenverhältnis von Luft zu Wasser ist der Quotient aus diesen beiden Volumina und wird als Void Fraction  $f$  bezeichnet.

$$f = \frac{V_L}{V_B} = \frac{Q \cdot T}{L \cdot B \cdot h} \quad [4]$$

Mit  $f$  lässt sich nun die Dichte  $\rho_g$  des Wasser-Luft-Gemisches in der Blasensäule berechnen, wenn  $\rho_L$  hierbei die Dichte von Luft ist.

$$\rho_g = f \cdot \rho_L + (1 - f) \cdot \rho_0 \quad [5]$$

Da die Dichte  $\rho_g$  beim Schleppen, also bei einer geneigten Blasensäule, nur in der dabei entstehenden senkrechten Höhe  $d$  der Blasensäule vorherrscht, ergibt sich die Druckreduzierung aus Gleichung [6].

$$\Delta p = \rho_0 \cdot g \cdot d - \rho_g \cdot g \cdot d \quad [6]$$

Die Höhe  $d$  kann aus der Länge  $L$  multipliziert mit dem Quotienten aus Blasenaufstiegs- geschwindigkeit  $s$  und Schleppgeschwindigkeit  $v$  berechnet werden. Wobei sich  $s$  aus der Auf- stiegsdauer der Blasen  $T$  und der Schlepptiefe  $h$  ergibt.

$$d = L \frac{s}{v} = \frac{Ld}{vT} \quad [7]$$

Ein markanter Punkt in der Arbeit von Actkinson ist die Abweichung der nach der aufgezeigten Theorie berechneten zu erwartenden Druckreduzierung und der tatsächlich im Modellversuch erreichten. So wurde bei Actkinson für einen Volumenstrom von 270 l/min eine theoretisch zu erwartende Druckreduzierung von 3,3 mbar berechnet. Tatsächlich wurden im Experiment aber nur maximal 0,2 mbar gemessen. Als Ursache für die Abweichung wurden von der Theorie nicht in Betracht gezogene dynamische Effekte genannt.

Daher ist ein weiterer Punkt, unserer Untersuchungen zu diesem Prinzip, die Vorhersage der Wirksamkeit bzw. der zur Zielerfüllung nötigen Ressourcen zu verbessern.

## Zielparameter

Die Druckreduzierung, die zum Ansprechen des Druckzündkreises erforderlich ist, liegt bei etwa 2,5 mbar. Die Zeitdauer, für die der reduzierte hydrostatische Druck vorliegen muss, beträgt ca. 10 Sekunden. Diese Werte sollen später von der Großausführung erreicht werden.

## Entwurf eines geeigneten Messsystems

Aus den Zielparametern ergibt sich eine weitere Herausforderung für die Messungen während der Modellversuche. Die zu erwartenden Schwankungen des hydrostatischen Drucks dürften sehr klein ausfallen, wenn sie bereits für die Großausführung nur 2,5 mbar erreichen müssen. Bei einer Wassertiefe des Versuchsbeckens von 2,5 m bis 3,0 m herrscht am Boden ein hydro- statischer Druck von ca. 1250 mbar bis 1300 mbar, während die Druckänderung, die aufge- zeichnet werden soll, nur etwa 0,01 Prozent des Gesamtdrucks entspricht. Die Sensoren müs- sen also, bei einer großen Grundlast sehr kleine Änderungen dieser Grundlast auflösen kön- nen. Da es beabsichtigt war, mehrere Sensoren zu einer Messkette zu kombinieren, durften die einzelnen Sensoren nicht zu teuer sein. Deshalb wurde entschieden, kein fertiges Mess- system zu kaufen, sondern aus Sensoren als Einzelkomponenten ein passendes Setup zu entwickeln.

Als geeignete Sensoren wurden der MS5803-02 und der MS5837-02 des schweizerischen Herstellers Measurement Specialties gefunden. Bei beiden Sensoren handelt es sich um Ab- solutdrucksensoren mit einem Messbereich von 0 bis 2 bar. Demnach sind sie, abzüglich des Atmosphärendrucks, für Wassertiefen bis knapp 10 m geeignet. Ein Wert, der für Labortests völlig ausreichend ist.

Die maximale Auflösung beim MS5803-02 beträgt 0,024 mbar und die Genauigkeit ist mit +/- 1,5 mbar angegeben, bei einer Oversampling Rate von 4096. Der MS5837-02 erreicht eine maximale Auflösung von 0,016 mbar bei einer Genauigkeit von 0,5 mbar und einer Oversampling Rate von 8192. Durch die höhere Oversampling Rate gibt der MS5837-02 Sensor alle 46 Millisekunden einen Messwert aus während der MS5803-02 Sensor alle 23 Millisekunden einen Messwert liefert. Daher wurde zugunsten einer besseren zeitlichen Auflösung der MS5803-02 als Drucksensor für die Modellversuche ausgewählt.

Die Drucksensoren nutzen zur Datenübertragung das I<sup>2</sup>C-Protokoll. Da die gewählten Sensoren aber nur zwei unterschiedliche Adressen ermöglichen, und mehr als zwei Sensoren verwendet werden sollten, wurde jeweils ein Sensor auf eine Adapterplatine gelötet und diese dann mit einem Arduino Nano Microcontroller verbunden (Abbildung 3, links). Die Kommunikation der einzelnen Sensoren mit dem Mess-PC erfolgt mittels der Microcontroller und eines USB-Hub über die USB-Schnittstelle am PC. Dabei wird jeder einzelne Microcontroller als ein serieller Dateneingang erfasst. Die Messdaten wurden dann mit dem Programm LabView visualisiert und aufgezeichnet. Die Datenübertragung erwies sich hier als zuverlässig trotz einer Länge der USB-Kabel von 10 m. Ein Versuch mit 15 m hat ebenfalls funktioniert. Es wäre also möglich, falls es die Versuchsanordnung erfordert, die Kabellängen bis zur maximalen Einsatztiefe der Sensoren zu vergrößern.

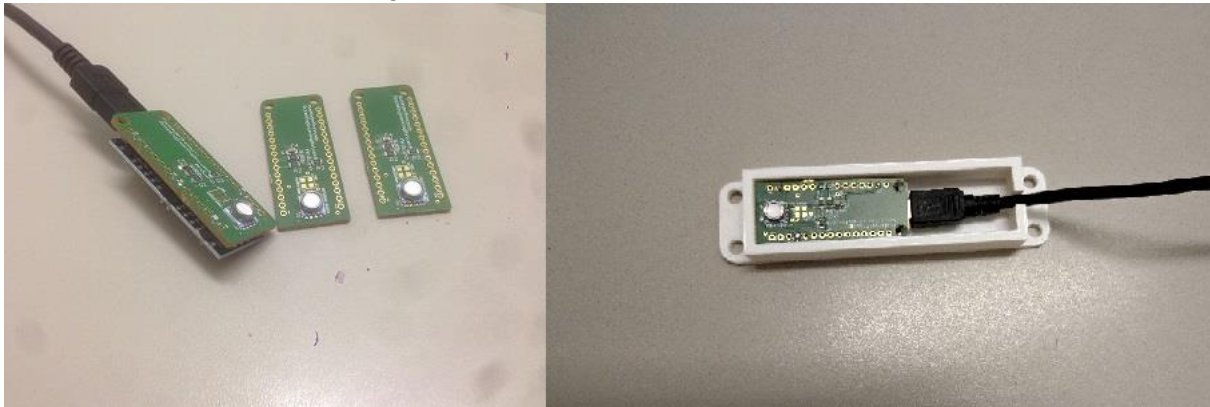


Abbildung 3: Sensoren gelötet (links) und vor dem Verguss im Gehäuse (rechts)

Nachdem die Kommunikation zwischen den Sensoren und dem Mess-PC getestet wurde, konnten die fertig gelöteten Sensoren in ein passendes, mittels 3D-Druck hergestelltes, Gehäuse eingelegt werden (Abbildung 3, rechts). Danach wurden die Sensoreinheiten in ihren Gehäusen druckneutral mit einer Polyurethan-Vergussmasse vergossen. Es wurden einschließlich des Prototyps fünf Sensoreinheiten hergestellt. Diese fünf Sensoreinheiten wurden dann im Abstand von 30 cm auf einem Träger befestigt, der dann im Versuchsbecken quer zur Schlepprichtung des Blaseninjektors auf den Grund gelegt werden konnte (Abbildung 4).



Abbildung 4: Messkette mit den fünf Drucksensoren

## Modellversuche

Die Modellversuche fanden im Rundlaufbecken des Lehrstuhls für Strömungsmechanik an der Universität Rostock statt.

Vor den eigentlichen Versuchen mussten zunächst die passenden Materialien für das Modell gefunden werden. Als erstes wurden daher verschiedene Materialien geprüft, die als Injektor für die Luft in Frage kamen. Hierbei ging es darum ein möglichst homogenes Blasenfeld zu erzeugen. Ein weiteres Kriterium war der Durchmesser der ausströmenden Blasen. Dieser sollte möglichst klein sein, da kleinere Blasen langsamer aufsteigen als größere, und eine damit einhergehende längere Verweildauer der Blasen in der Wassersäule, den gewünschten Effekt der Druckreduzierung positiv beeinflussen würde. Angestrebt war ein durchschnittlicher Blasendurchmesser von 3 mm oder weniger. Nach Clift et al. liegt die Aufstiegs geschwindigkeit für Luftblasen dieser Größenordnung bei 0,3 m/s.



Abbildung 5: Unterschiedliche Schläuche als Luftinjektoren

In Abbildung 5 sind die unterschiedlichen Schläuche, die in Erwägung gezogen wurden, zu sehen. Deutlich zu erkennen ist hierbei, dass der Schlauch aus Gummi-Sintermaterial, im Bild ganz links, das homogenste Blasenfeld mit einem hohen Anteil an kleinen Blasen erzeugt. Bei den anderen getesteten Schläuchen handelt es sich um Kunststoffschläuche, die in gleichmäßigen Abständen eine Reihe kleiner Löcher aufweisen. Dabei ist der Schlauch in der Mitte der Abbildung zusätzlich mit einem durchlässigen Gewebe ummantelt, während der Schlauch rechts im Bild keine weitere Ummantelung aufweist. Die Blasen treten bei beiden Alternativen aber nur lokal begrenzt aus und sind im Durchschnitt auch größer als bei dem Schlauch aus Gummi-Sintermaterial. Aus diesen Gründen wurde dieser Schlauch dann zum Bau des Modells eines Blaseninjektors verwendet.

Das für die hier vorgestellten Versuche verwendete Modell ist in Abbildung 6 dargestellt.

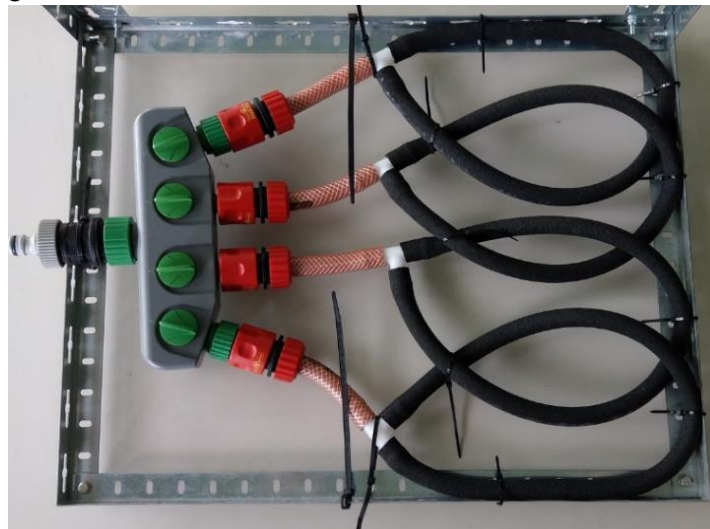


Abbildung 6: Blaseninjektor mit Schlauchpaket

Um die Schleppversuche durchzuführen, wurde das Modell am Schlepparm des Rundlaufbeckens befestigt. Außerdem wurde ein Schiltknecht Flügelradanemometer vom Typ MiniWater20 Mini zur Geschwindigkeitsmessung an dem Schlepparm befestigt. Dieses hat einen Messbereich von 0,03 – 10 m/s bei einer Genauigkeit von +/- 2 % des Gesamtmessbereichs. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist aus Abbildung 7 ersichtlich.

Die Modellversuche wurden mit drei unterschiedlichen Schleppgeschwindigkeiten durchgeführt. Außerdem wurde in drei unterschiedlichen Tiefen geschleppt und damit der Abstand zu den Drucksensoren am Boden variiert. Gleichzeitig wurden jeweils drei verschiedene Druckniveaus am Ausgang des Kompressors und damit unterschiedliche Durchflussraten eingestellt.

Die Drucksensoren befanden sich in 2,55 m Wassertiefe. Der Blasenerzeuger wurde in Tiefen von 1,83 m, 2,03 m und 2,23 m geschleppt. Am Kompressor wurden 2 bar, 3 bar und 4 bar als Druck am Auslass eingestellt. Dies entsprach Durchflussraten von 135 bis 390 l/min.

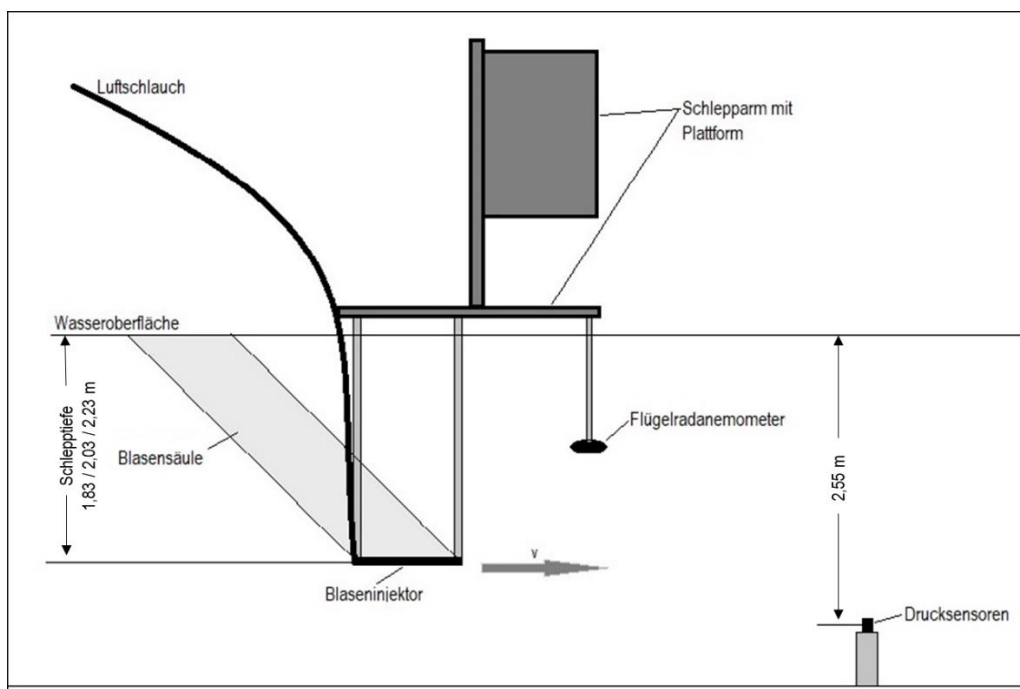


Abbildung 7: Skizze des Versuchsaufbaus

## Ergebnisse

Die gemessenen Druckverläufe beim Überlauf über die Messkette sind in den Plots 8 bis 10 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung sind die Messwerte als gleitender Mittelwert über 15 Messwerte dargestellt. Zur Auswertung wurde jeweils der Sensor in Mitte der Messkette herangezogen, da dieser erwartungsgemäß den größten Ausschlag zeigte.

Die eingesetzte Messkette hat wie erwartet funktioniert. Die erzeugten Drucksignaturen konnten trotz der sehr kleinen Amplituden zuverlässig erfasst und ausgewertet werden.

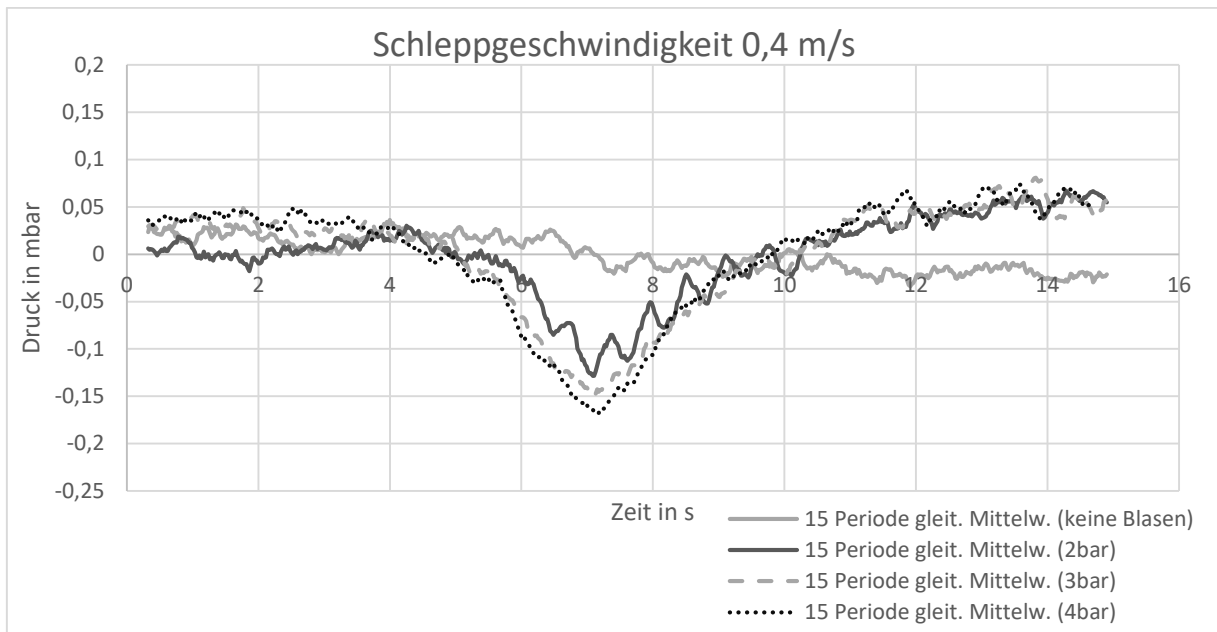


Abbildung 8: Vergleich der unterschiedlichen Volumenströme

Zu Beginn der Messungen wurde der Blasenerzeuger bei allen drei Geschwindigkeiten jeweils ohne ausströmende Blasen geschleppt, um zu sehen, welche Auswirkung der Schleppkörper allein auf den Druck hat. In Abbildung 7 ist der Druckverlauf für die verschiedenen Durchflussraten dargestellt. Hierbei entsprechen 2 bar Druck am Kompressoraustrag 135 l/min Luft, bei 3 bar sind es 240 l/min und bei 4 bar 360 l/min. Der Effekt der Blasensäule wird deutlich im Vergleich zu der Messung ohne Blasen. Zu sehen ist auch, dass der Effekt mit zunehmendem Volumenstrom größer wird. Mit etwa 0,15 mbar liegen die Werte wieder weit unter der nach Actkinson theoretisch vorausgerechneten Druckreduzierung. Aber an dieser Stelle belegt der Blick auf den Vergleich der unterschiedlichen Schlepptiefen in Abbildung 8, dass die rein statische Betrachtung in der Praxis nicht standhält. Würde allein die Theorie zutreffen, dann sollte der Abstand der Drucksensoren zum Blasenteppich keine Auswirkung auf den gemessenen Druck haben, zumindest solange wie sich die vollständige senkrechte Höhe der Blasensäule  $d$  innerhalb der Wassersäule befindet.

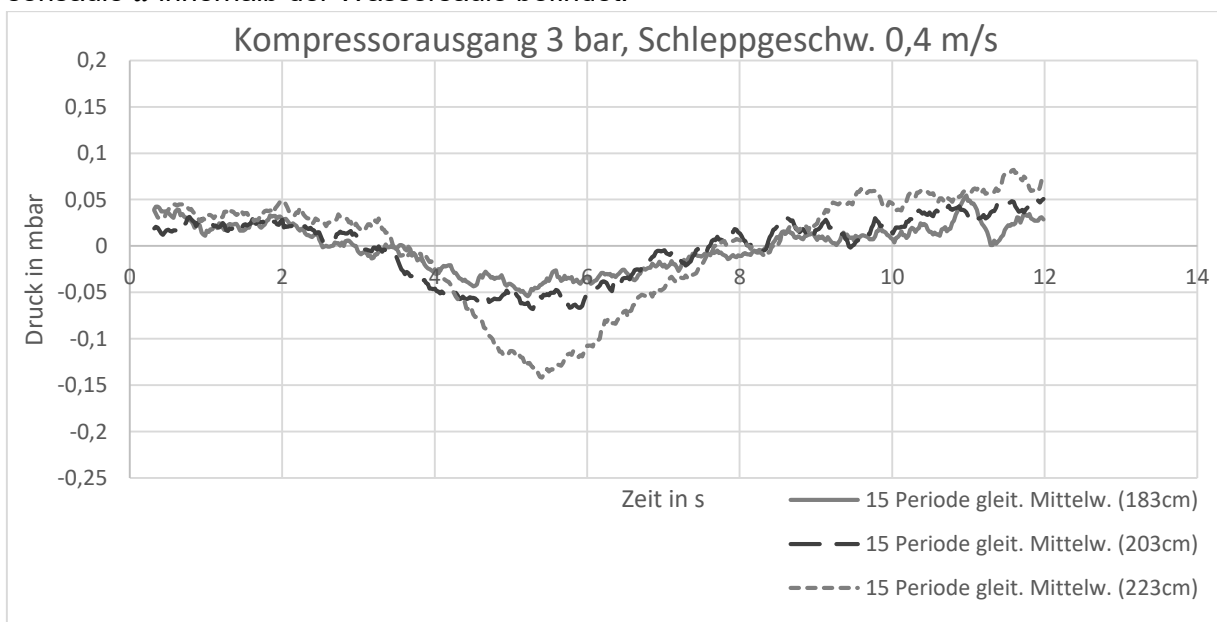


Abbildung 9: Vergleich der unterschiedlichen Schlepptiefen



Aus den Vorbetrachtungen ergab sich die Erwartung, dass der Effekt der Blasensäule größer wird, je langsamer der Blasenerzeuger geschleppt wird. Da bei einer geringeren Schleppgeschwindigkeit die Neigung der Blasensäule geringer und damit ihre senkrechte Höhe  $d$  größer ist. Siehe hierzu Gleichungen [6] und [7]. Dieser Effekt war in den Messungen jedoch nicht ersichtlich. Abbildung 9 zeigt, dass die verschiedenen Schleppgeschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Dauer der wirksamen Druckreduzierung haben. Dies könnte daran liegen, dass die untersuchten Schleppgeschwindigkeiten zu nah beieinander lagen.

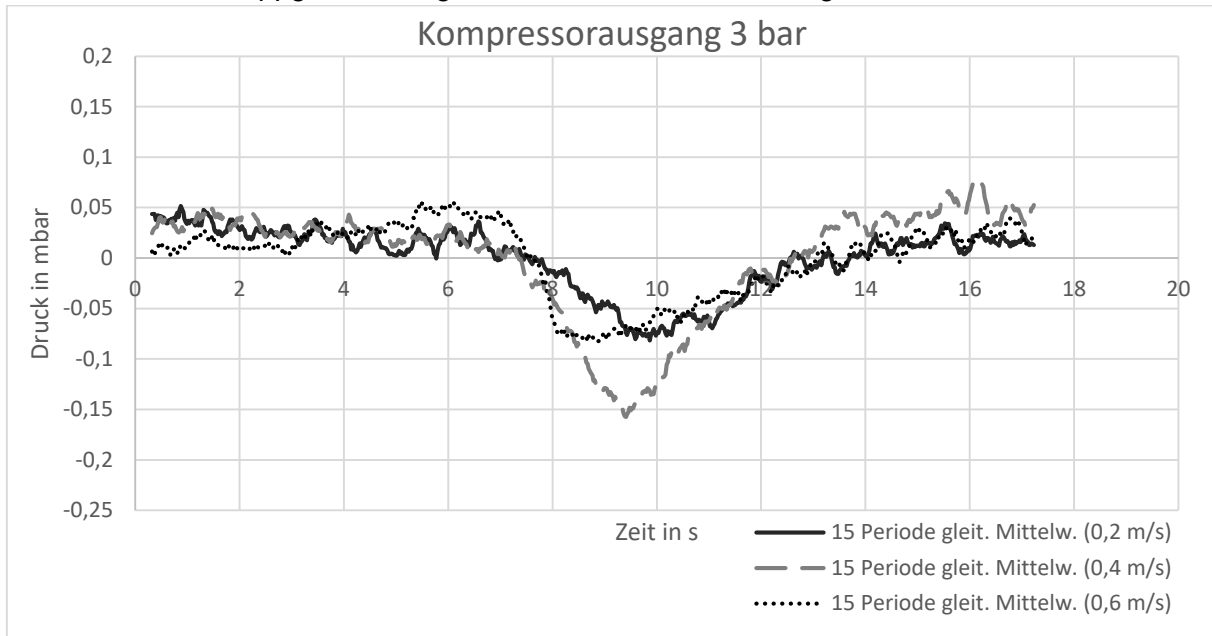


Abbildung 10: Vergleich der unterschiedlichen Schleppgeschwindigkeiten

## Zusammenfassung und Ausblick

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Präsentation der aktuellen Ergebnisse des laufenden Projekts. Die für die Versuche entwickelte Messtechnik hat sich bei den durchgeführten Versuchen als gut geeignet erwiesen und kann auch für die Untersuchung weiterer Lösungskonzepte im Rahmen dieses Projektes genutzt werden.

In den durchgeführten Modellversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die von Actkinson präsentierte Theorie, durch die zugrundeliegenden Vereinfachungen, offensichtlich wesentliche physikalische Ursachen und deren Wirkung nicht berücksichtigt. Die dynamischen Prozesse innerhalb der erzeugten Blasensäule werden dadurch vernachlässigt. Diese werden im Fortgang des Projekts Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Ziel dabei ist die Modellbildung für eine zuverlässige Prognose der Druckreduzierung und der dafür nötigen Ressourcen.

## Literatur

**Actkinson, J. I., (2011)** Minesweeping for pressure actuated mines by air injection into a water column, Naval Postgraduate School, Monterey, California.

**Clift, R., Grace, J. R., Weber, M. E., Weber, M. F., (1978)** Bubbles, Drops, and Particles, University of California, Academic Press.

**Klug, C. A., (1955)** Development Of A Device For Pressure Mine Sweeping, Department Of The Navy, Office Of Naval Research.

**Peters, D., Schneider, E., (1987)** Patent DE3731970 Vorrichtung zur Nachbildung von Schiffskörpern zur Minenabwehr.

**Truckenbrodt, E., (1996)** Fluidmechanik Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide, Vierte, ergänzte Auflage. Springer.

