

PIV Untersuchung der von *Mytilus* sp. verursachten Strömung

PIV Investigation of the flow induced by the blue mussel, *Mytilus* sp.

A. Klemmstein¹, S. Forster¹, S. Grundmann², M. Brede²

¹Universität Rostock, Institut für Biowissenschaften, Albert-Einstein-Str. 3, 18059 Rostock

²Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Freistrahlsströmung, Biofluidik, *Mytilus* sp.
jet flow, biofluidics, *Mytilus* sp.

Abstract

Miesmuscheln (*Mytilus* sp.) verwenden einen hocheffizienten Pumpmechanismus um Nahrung aus der Umgebung aufzunehmen und das aufgenommene Wasser wieder auszustoßen. Beim Ausstoßen entsteht ein gerichteter Freistrahls mit kleinem Öffnungswinkel und einer hoher Wurfweite, der Atemwasserausstrom. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der evolutionären Optimierung dieses Strömungssystem auf eine besonders hohe Effizienz hinsichtlich der Nahrungsaufnahme und der Entsorgung des gefilterten Fluids optimiert wurde. Ziel des gerichteten Freistrahls ist es, das gefilterte, nahrungspartikelfreie Fluid aus dem Nahbereich der Bodengrenzschicht zu entfernen und so eine hohe Durchmischung der Bodengrenzschicht mit Nahrungspartikeln zu gewährleisten. Im Folgenden wurden die Strahlparameter an einer Anzahl aktiver Muschelindividuen laseroptisch mit Particle Image Velocimetry (PIV) bestimmt, um eine quantitative Datengrundlage zu diesen Freistrahlen zu gewinnen. Diese Daten dienen dann als Randbedingung für weitere Experimente zu Gestaltung einer biomimetischen Oberfläche zur Durchmischung von Wandgrenzschichten.

Einleitung

Miesmuscheln spielen global eine wichtige ökologische Rolle. Die Muscheln sind für viele Tiere Nahrungsgrundlage und bilden in ihrer aggregierten Form als Muschelbänke einen Lebensraum für unzählige Organismen. Des Weiteren gibt es einen sehr verbreiteten wirtschaftlichen Nutzen, da die Muscheln von Menschen verzehrt werden. Auch in der Medizin sind die Miesmuscheln von großem Interesse. Ihr eigens erzeugter „Klebstoff“ haftet hervorragend im Nassen und er ermöglicht es organische mit anorganischen Materialien zu Verbinden. Da die Muscheln in allen Weltmeeren vorkommen (Dance, 1998; Lindner 1999) sind sie das geeignete Versuchstier von globalem Interesse. Die Toleranzen der Tiere gegenüber Temperatur und Salzgehalt unterstützen die Eignung als Versuchstier.

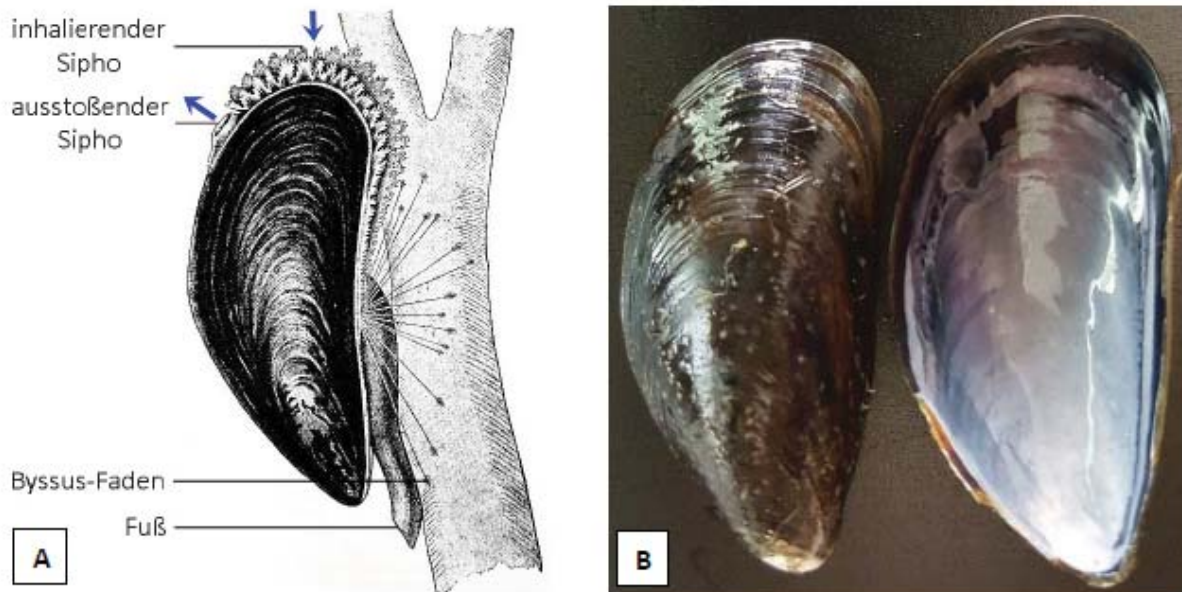


Abbildung 1: Habitus von *Mytilus*: Zeichnung von *Mytilus edulis* (A) (Lang & Hescheler 1900), verändert mit Pfeilen, die die Filtrationsströme darstellen und (B) Muschelschalen von *Mytilus* sp., links = außen, rechts = innen

Während der Filtration von Muscheln wird eine Strömungsstruktur beobachtet, die aus einem Einstrombereich durch den inhalierenden Siphon und einem Strahl aus Ausatemwasser durch den ausstoßenden Siphon besteht (Abb. 1 (A)). Beide Strömungsbereiche werden von der Muschel durch die Filtrationsorgane, den Siphonen, aktiv gesteuert. Die Strahlströmung erfolgt kontinuierlich, ist jedoch hinsichtlich Form und Intensität im Minutenbereich zeitabhängig.

Miesmuscheln sind mit ihren hohen Filtrationsraten wichtige Wasserreiniger in der Ostsee. Clausen & Riisgard (1996) beschrieben eine steigende Wachstumsrate von *Mytilus edulis* mit der Algenkonzentration. In Bodennähe bzw. über einer Muschelbank ist die Algenkonzentration allerdings gering (Clausen & Riisgard, 1996). Die Phytoplankton-Konzentration wird in der Wasser-Sediment-Grenzschicht durch dynamische Interaktionen der durch Atemwasserausströme erzeugten Strömung mehrerer Muscheln oder einer Muschelbank hervorgerufen (O’Riordan *et al.*, 1995). Durch mehrere Studien wurde eine Ausgangsposition mit schlechter Futterverfügbarkeit in der Wasser-Boden-Grenzschicht beschrieben. Die Muscheln sind jedoch in der Lage diese Situation durch eigens erzeugte Strömung zu beeinflussen. Die Filtrationsaktivität von Muscheln und besonders von ganzen Muschelbänken haben einen enormen Einfluss auf die Austauschprozesse an der Sediment-Wasser-Grenzschicht (Van Duren *et al.*, 2006). Muschelbänke erzielen in ihrer Form als raue Struktur am Meeresboden Turbulenzen (Van Duren *et al.*, 2006). Diese durch Muscheln verursachte Turbulenzen sind noch nicht ausreichend untersucht, um sie in Modellen mit einbeziehen zu können (Riisgard *et al.*, 2011). Die Untersuchung des Atemwasserausstroms und seine Effekte auf Sediment-Wasser-Grenzschicht sind daher von großem Interesse.

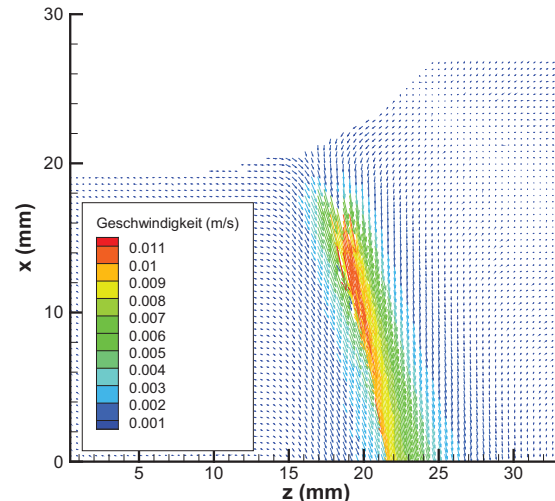
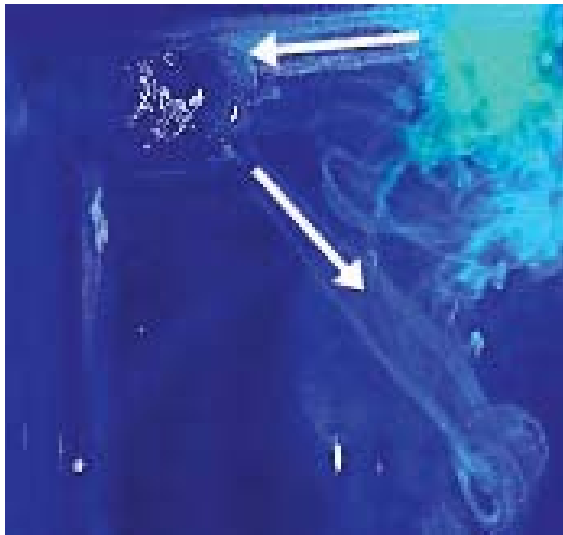


Abbildung 2: Atemwasserausstrom, Farbexperiment (Klemmstein, 2018) (links), PIV (rechts, 300 Vektorfelder, average correlation)

Erste PIV-Messungen an *Mytilus edulis* dienten nur der Einführung der Messmethode PIV (Stamhuis, 2006). Im Jahre 2008 waren die Messungen im meeresbiologischen Bereich noch relativ neu (Frank *et al.*, 2008). Damals wurden ebenfalls die von *Mytilus edulis* erzeugten Filtrationsströme mit Hilfe von PIV vermessen. (Frank *et al.*, 2008). Danach wurden die Filtrationsströme mehrere Muscheln miteinander verglichen (Troost *et al.*, 2009). Mittels PIV wurde die inhalierende Strömung bestimmt und mathematisch wurde die ausströmende Strömung konstruiert (Troost *et al.*, 2009). Anschließend wurde durch PIV die Geschwindigkeitsfelder des ausströmenden Freistrahls bestimmt (Riisgard *et al.*, 2011). Im Folgenden wird der Atemwasserausstrom mit Hilfe von PIV quantitativ charakterisiert (Abb. 3). Der Ausstrom verdeutlicht den Einfluss der tierisch erzeugten Strömung auf das Medium und den Effekt des Mischens(siehe auch Abb. 2).

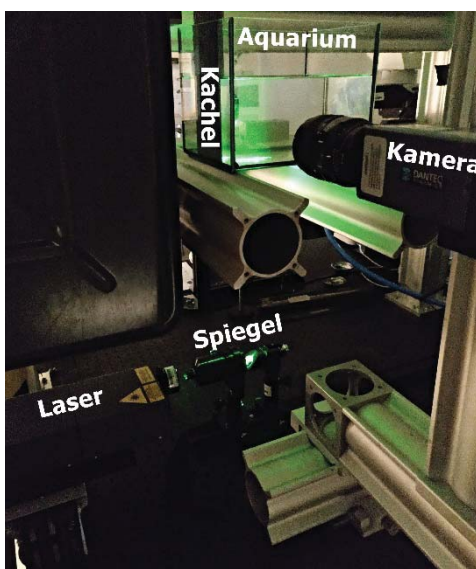


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau der PIV-Anlage

Ergebnisse

Die Strömung an den Muscheln wurde mit Hilfe von PIV in zwei Schnittebenen erfasst. Die eine Ebene wurde senkrecht längs auf der Muschelöffnung zentriert, die zweite Ebene senkrecht zur Muschelöffnung (siehe Abb. 4) In jeder Ebene wurden bei stationären Strahlbedingungen über einen Zeitraum von einer Minute 300 Geschwindigkeitsfelder erfasst und mit

Hilfe der Average Correlation in Dantec Dynamic Studio zu einem zeitgemittelten Feld ausgewertet (IA 32px x 32px, 50% Overlap). Längs und quer zum Strahl wurde in jedem zeitgemittelten Feld das Geschwindigkeitsprofil erfasst (Abb. 4).

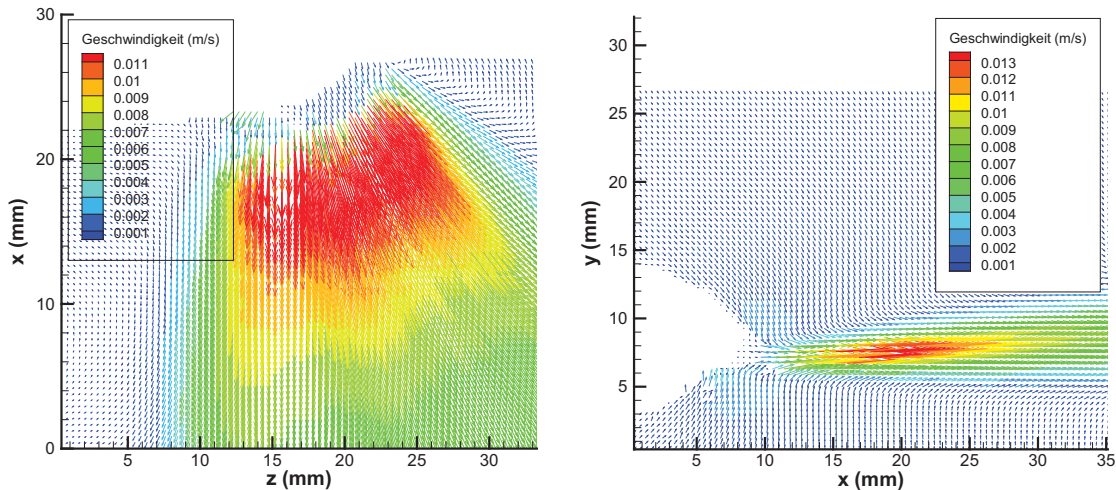


Abbildung 4: PIV-Aufnahmen wurden in zwei Schnittebenen angefertigt.

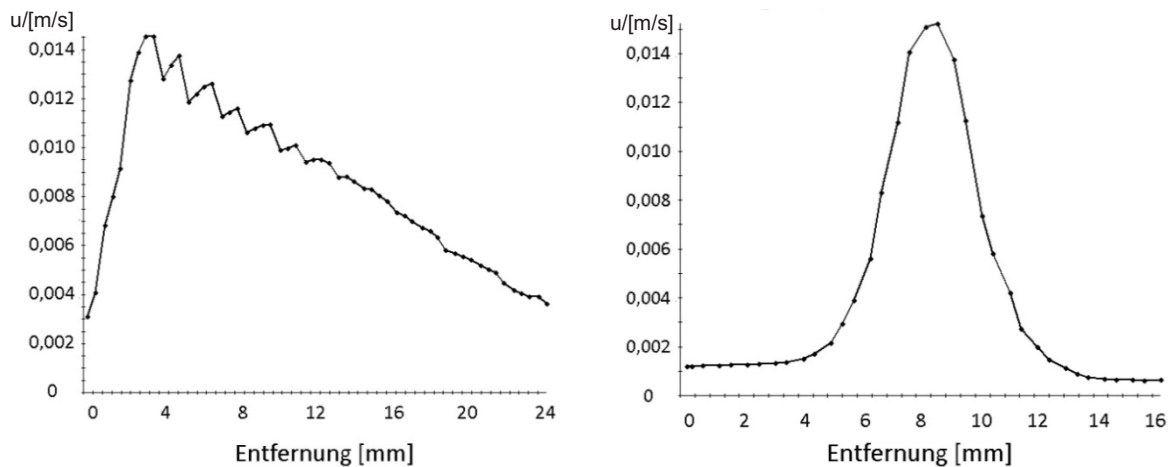


Abbildung 5: Geschwindigkeitsprofile axial (links) im Strahl und senkrecht zur Strahlachse (rechts) aus PIV, jeweils in beiden Ansichten zur Volumenstrombestimmung.

Aus den Geschwindigkeitsprofilen lassen die Öffnungswinkel der Muscheln bestimmen (siehe Abb. 5). Zur Visualisierung der Datenverteilung ist ein Box-Plot erstellt worden (Abb. 6). Der kleinste Öffnungswinkel betrug $18,93^\circ$. Der größte Öffnungswinkel betrug 54° und wurde an der kleinsten und leichtesten Muschel gemessen. Aus allen zehn Messungen ergab sich ein mittlerer Öffnungswinkel von $28,37^\circ$. Nach Prüfung der Daten auf Normalverteilung wurde ein nicht-parametrischer Korrelationstest nach Spearman durchgeführt. Der Öffnungswinkel weist keinen signifikanten Zusammenhang zu den Faktoren Frischgewicht, Trockengewicht und aschefreies Trockengewicht und Schalenlänge auf. Der Öffnungswinkel ist demnach unabhängig von Gewicht und Größe der Muscheln.

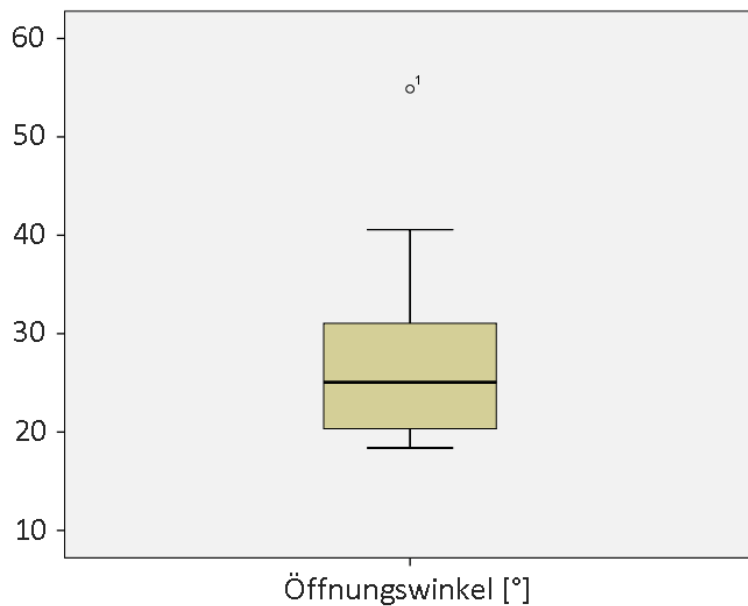


Abbildung 6: Öffnungswinkel des Atemwasserausstroms

Aus den Geschwindigkeitsprofilen konnte der Volumenstrom abgeschätzt werden. Zur Visualisierung der Datenverteilung ist ein Box-Plot erstellt worden (Abb. 7). Der kleinste Volumenstrom war 1278 mm³/s. Der größte Volumenstrom war 6516 mm³/s. Aus allen Messungen ergab sich ein mittlerer Volumenstrom von 3203 mm³/s. Nach Prüfung der Daten auf Normalverteilung wurde ein nicht-parametrischer Korrelationstest nach Spearman durchgeführt. Der Volumenstrom weist keinen signifikanten Zusammenhang zu den Faktoren Frischgewicht, Trockengewicht und aschefreies Trockengewicht und Schalenlänge auf. Zusammenfassend weist der Volumenstrom keinen signifikanten Zusammenhang zu den Gewichten und Größen der Muscheln.

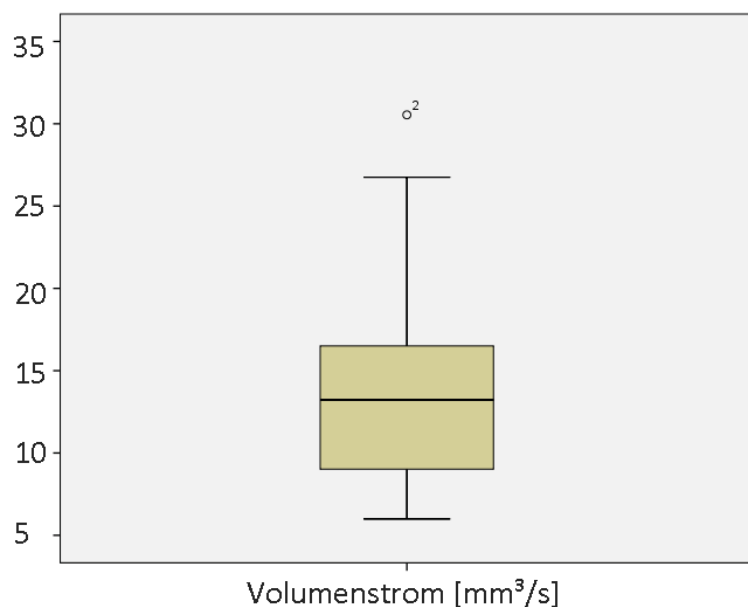


Abbildung 7: Volumenströme des Atemwasserausstroms

Diskussion

Mit PIV konnten zunächst die maximalen Geschwindigkeiten an einer Muschel von 29,02 mm/s und die über alle Individuen gemittelte maximale Geschwindigkeit von 12,38 mm/s bestimmt werden. Die Geschwindigkeiten des Atemwasserausstroms wurden auch schon in früheren Arbeiten bestimmt. Riisgard *et al.* (2011) bestimmte unter anderem mit PIV und Particle Tracking Velocimetry (PTV) eine Ausstromgeschwindigkeit von 86 mm/s (PIV) und 87 mm/s (PTV). Troost *et al.* (2009) bestimmt mittels PIV die höchste Ausstromgeschwindigkeit von 185 mm/s an *Mytilus edulis*. Diese Ausstromgeschwindigkeit wurde jedoch mathematisch aus der Siphosquerschnittsfläche und der Filtrationsraten berechnet. Frank *et al.* (2008) untersuchte unter anderem mit PIV auch die Ausstromgeschwindigkeit von *Mytilus edulis*. Er bestimmte im Abschnitt „Animal-generated flow velocity“ eine mittlere Geschwindigkeit von 43,2 mm/s und eine maximale Geschwindigkeit von 123,1 mm/s. Im Abschnitt „Mussel feeding study“ ermittelte er eine gemittelte maximale Geschwindigkeit von 17 mm/s - 38 mm/s. Diese Geschwindigkeiten entsprechen den in dieser Arbeit mittels PIV ermittelten Geschwindigkeiten. Ein Zusammenhang der Ausströmgeschwindigkeiten von den Größen und Gewichten der Muscheln konnte durch die Ergebnisse nicht bestätigt werden.

Die Öffnungswinkel des Atemwasserausstroms korrelierten mit den Geschwindigkeiten und dem Geschwindigkeitsverlust/Zeit. Der Öffnungswinkel des Atemwasserausstroms ist entsprechend abhängig von der Geschwindigkeit des Atemwasserausstroms. Anatomisch ist nicht zu vernachlässigen, dass der ausströmende Siphos einen kleineren Durchmesser als der inhalierende Siphos hat. Da das gleiche Volumen an Wasser was inhaliert wurde auch ausgestoßen wird geht das mit einer erhöhten Geschwindigkeit einher. Ein Zusammenhang des Öffnungswinkels des Atemwasserausstroms von den Größen und Gewichten der Muscheln konnte durch die Ergebnisse nicht bestätigt werden.

Neben der Bestimmung der Geschwindigkeit ist es auch möglich aus den Geschwindigkeitsfeldern das Volumen des Atemwasserausstroms zu bestimmen. Den Volumenstrom von Tieren ohne Berührung bzw. Störungen zu vermessen ist mittels PIV möglich (Frank *et al.*, 2008). In dieser Arbeit wurde ein maximaler Volumenausstrom von 6516 mm³/s und ein mittlerer Ausstrom von 3203 mm³/s ermittelt.. Frank *et al.* (2008) setzte den Volumenstrom mit der Clearance-Rate gleich. Die Clearance-Rate beschreibt ein bestimmtes Volumen an Wasser indem alle Partikel entfernt wurden (hier durch Filtration der Muscheln) pro Zeit (Davenport & Woolmington; 1982). Da er den Volumenstrom in diesen Experimenten durch Rohre bestimmt wurde ist diese Gleichsetzung möglich. Der Volumenstrom aus den Experimenten dieser Arbeit wurde an lebenden Miesmuscheln vermessen. Nach dem Austreten des filtrierte Wassers in das umgebende Medium, bleibt der Volumenstrom nicht im Durchmesser des Siphos, sondern weitet sich auf. Daher ist es nicht mit den Rohr-Experimenten von Frank *et al.*, 2008 und damit auch nicht mit der Clearance-Rate zu vergleichen. Weitere Volumenströme wurden in Experimenten von Frank *et al.* (2008), Willemsen (1954), und Bernard & Noaks (1990) bestimmt. Die Volumenströme befinden sich alle in einem ähnlichen Größenspektrum.

Mittels PIV war es möglich, die Geschwindigkeit, den Geschwindigkeitsverlust, den Öffnungswinkel und den Volumenstrom des Atemwasserausstroms zu bestimmen. Mit dieser Messmethode es nur möglich zwei Dimensionen zu vermessen. Bei zukünftigen Messungen sollen zusätzlich die Querschnittsflächen der Siphos erfasst werden (Frank *et al.*, 2008). Durch diese zusätzliche Information wird es ermöglicht, die Ergebnisse in Zusammenhang mit den Siphosöffnungen oder Siphosquerschnittsfläche zu bringen, da schon in früheren Studien ein Zusammenhang zwischen Filtrationsrate und Muschelöffnung beschrieben wurde (Jorgenson *et al.*, 1988; Riisgard *et al.*, 2003). Die Leistungen der Muscheln wären präzise abhängig von den Siphosbedingungen zu quantifizieren.

Literatur

- Bernard F. R., Noaks D. J. 1990: Pumping rates, water pressure, and oxygen use in eight species of marine Bivalve Molluscs from British Columbia, *Can. J. Fish. Aqua. Sci.*, Vol. 47: pp. 1302-1206
- Clausen I. B., Riisgard H. U. 1996: Growth, filtration and respiration in the mussel *Mytilus edulis*: no evidence for physiological regulation of the filter-pump to nutritional needs, *Mar. Ecol. Prof. Ser.*, Vol 141: pp. 37-45
- Dance S. P. 1998: *Muschel und Schnecken*, 2. Aufl., Berlin: Urania-Ravensburger, S.214
- Davenport J., Woolmington A. D. 1982: A new method of monitoring ventilator activity in mussels and its use in a study of the ventilator patterns of *Mytilus edulis* L., *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 62: pp. 55-67
- Frank D. M., Ward J. E., Shumway, Holohan B. A., Gray C. 2008: Application of particle image velocimetry to the study of suspension feeding in marine invertebrates, *Mar. Freshwat. Behav. Physiol.*, Vol. 41: pp. 1-18
- Jorgensen C. B., Larsen P. S., Mohlenerg F., Riisgard H. U. 1988: The mussel pump: properties and modeling, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 45: pp. 205-216
- Klemmstein, A., 2018: Charakterisierung und ökologische Auswirkungen des Atemwasserausstroms von *Mytilus sp.*, Masterarbeit, Universität Rostock
- Lang, A, Hescheler, K. 1900: *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Thiere*, Jena 2. Aufl.
- Lindner G. 1999: *Muschel und Schnecken der Weltmeere: Aussehen, Vorkommen, Systematik*, 5. Aufl, München, S. 150
- O’Riordan C. A., Monismith S. G., Koseff J. R. 1993: A study of concentration boundary-layer formation over a bed of model bivalves, *Limnol. Oceanogr.* Vol. 38: pp. 1712-1729
- Riisgard H. U., Jorgenson B. H., Lundgreen K., Storti F., Walther J. H., Meyer K. E., Larsen P.S. 2011: The exhalant jet of mussels *Mytilus edulis*, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 437: pp. 147 – 164
- Stamhuis E. J. 2006: Basics and principles of particle image velocimetry (PIV) for mapping biogenic and biologically relevant flows, *Aquat. Ecol.*, Vol. 40: pp. 463-479
- Troost K., Stamhuis E. J., Duren L. A. 2009: Feeding current characteristics of three morphologically different bivalve suspension feeders, *Crassostrea gigas*, *Mytilus edulis* and *Cerastoderma edule*, in relation to food competition, *Mar. Biol.*, Vol. 156: pp. 355-372
- Wilemsen J. 1954: Quantities of water pumped by mussel (*Mytilus edulis*) and cockle (*Cardium edule*), *Arch. Neerland. de Zool.*, Vol. 10: pp. 153-160
- Van Duren L. A., Herman P. M. J., Sandee A. J. J., Heip C. H. R 2006: Effects of mussel filtering activity on boundary layer structure, *J. Sea Re.*, Vol. 55: pp. 3-14