

IN-SITU MESSUNGEN SCHIFFSINDUZIERTER WELLENAUSBREITUNG UND –REFLEXIONEN IM BREMER EUROPAAHAFEN

von

Nannina Horstmann¹
Knut Krämer²
Nils Goseberg³
Torsten Schlurmann⁴

ABSTRACT

Ship-induced waves may affect harbour operations such as loading and unloading of moored ships. Especially if the frequency of these externally-triggered waves coincides with any of natural eigenfrequencies of the harbour basin, excessive motion of a moored ship can occur which can in consequence result in extensive damage to ships and piers if mooring lines fail. In the harbour basin “Europahafen” in the city of Bremen ship-induced waves caused several problems to moored recreational crafts at a pier and therefore, the development and propagation of ship-induced waves has been investigated in order to quantify the impact of these waves on moored ships. The resulting water oscillations have been measured and recorded with pressure transducers and the wave heights as well as the wave periods have been calculated. Additionally, the frequency spectra for each time series have been analysed in order to check if ship-induced waves have similar frequencies compared to the natural frequency of the harbour basin which may lead to resonance and to a standing wave.

1. EINLEITUNG

Der tidebeeinflusste Europahafen befindet sich im Stadtgebiet von Bremen und ist über eine rund 60 m breite Zufahrt unmittelbar mit der Weser verbunden. Eine zukünftige erweiterte Nutzung der Wasserflächen im Hafenbecken sieht zum Beispiel „Wohnen auf dem Wasser“, Liegeplätze für historische Schiffe, Restaurant- Bade- oder Büroschiffe, Errichtung einer Seebühne sowie einen Elektromotorboot-Verleih vor. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der durch den Schiffsverkehr im Hafenbecken induzierten Wellenausbreitung und -reflexionen sowie den damit verbundenen Auswirkungen auf die angestrebten Nutzungen im Hafenbecken.

¹ Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, horstmann@fi.uni-hannover.de

² Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, kraemer@fi.uni-hannover.de

³ Dr.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, goseberg@fi.uni-hannover.de

⁴ Prof. Dr.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, schlurmann@fi.uni-hannover.de

Mehrfach wurde beobachtet, dass es durch große Wasserspiegelschwankungen im Bereich der sich bereits in Nutzung befindlichen Marina am südöstlichen Ende des Hafenbeckens zu Beeinträchtigung gekommen ist. Als Grund hierfür kann eine überhöhte Geschwindigkeit von Wasserfahrzeugen mit einhergehender großer Wasserverdrängung und eine zwangsläufig resonante Anregung in Längs- und Querrichtung des Hafenbeckens in Frage kommen, wobei eine Reflexion von induzierten Schiffswellen aufgrund der klassischen geschlossenen Spundwandbauweise im gesamten Hafenbecken ursächlich erscheint.

Im Rahmen einer in-situ-Messungskampagne wurde die Schiffswellenausbreitung erfasst sowie Anregungsmechanismen infolge Resonanzen ermittelt, um hieraus resultierende Handlungsoptionen in den Masterplan zur zukünftigen Nutzung der Wasserflächen integrieren zu können. Nachfolgend wird ein Überblick über die in-situ-Messungen gegeben sowie die Ergebnisse der Messauswertung dargestellt.

2. MESSDURCHFÜHRUNG

2.1 Untersuchungsgebiet

Der tidebeeinflusste Europahafen mit einer ungefähren Länge von 1,5 km und einer Breite von 105 m befindet sich im Bremer Stadtgebiet und ist über eine rund 60 m breite Zufahrt unmittelbar mit der Weser verbunden. Die Marina befindet sich, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, am Ende des Hafenbeckens.

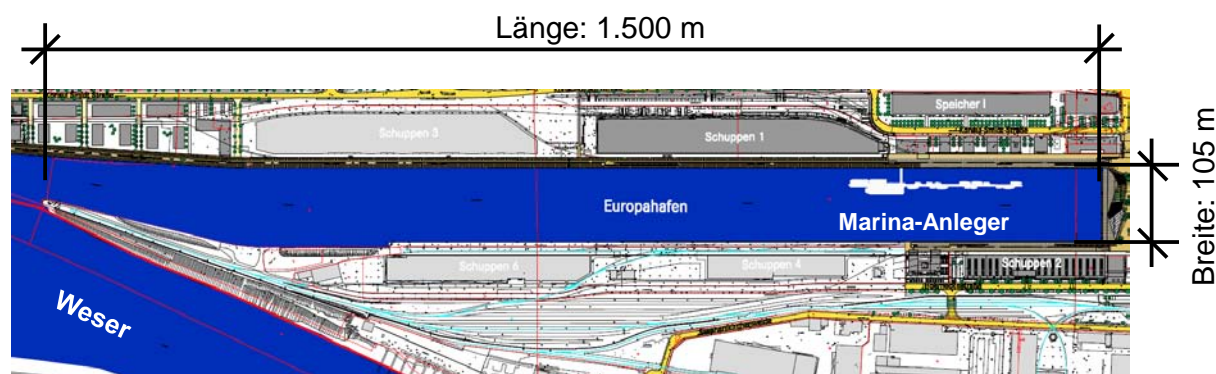


Abbildung 1: Draufsicht Hafenbeckens des Bremer Europahafens [nach WFB, 2012]

Aus der letzten Hafenpeilung ergeben sich die tatsächlichen Sohliefen des Hafenbeckens, die im Bereich der Fahrrinne bei -6,00 bis -9,00 mNN und an den Spundwänden bei -2,00 bis -5,00 mNN liegen.

2.2 Messdurchführung und Messprogramm

Generell gestalteten sich die in-situ-Messungen in der Art, dass mittels des Einsatzes von Schiffen Wellen erzeugt und die entstehenden Wasserspiegelschwankungen mit vier Pegelloggern (Druckmessdosens inkl. Datenlogger) aufgezeichnet wurden, welche gemäß Abbildung 2 auf einer Kajenseite installiert waren.

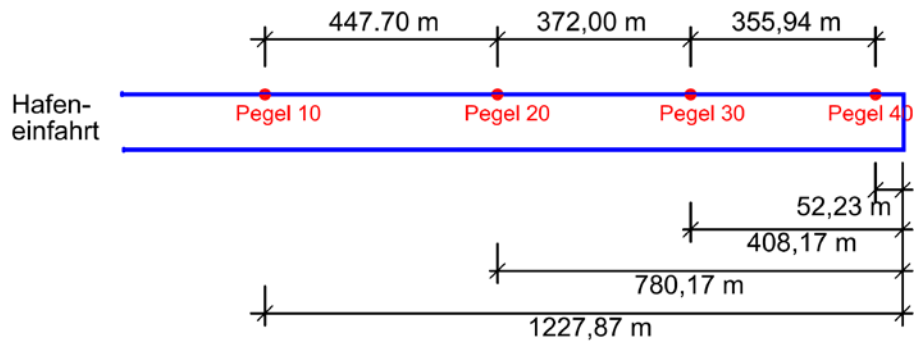


Abbildung 2: Positionierung der Pegellogger Nr. 10 bis 40 im Hafenbecken

Die Aufzeichnungsfrequenz der Pegellogger beträgt 10 Hz für Pegel 10 und 32 Hz für Pegel 20, 30 und 40. Der maximale Messbereich jeder Druckmessdose liegt bei 1000 mBar, was einer Wassersäule von 10 m entspricht. Zur Vermeidung von unerwünschten Bewegungen und zum Schutz der Druckmessdosen im Wasser wurde ein U-Profil aus Stahl mit einem Gewicht von ca. 10 kg verwendet, an dem die Druckmessdose befestigt wurde.

Die in-situ-Messungen im Hafenbecken wurden an zwei Tagen durchgeführt. Am ersten Messtag sind die Schiffswellen durch das institutseigene Messboot „BS-D 599“ erzeugt worden und am zweiten Messtag konnte das kombinierte Feuerwehr- und Polizeischiff „Bremen 1“ sowie das Polizeischiff „Lesmona“ für die Messkampagne gewonnen werden. Abmaße und Tiefgang der eingesetzten Boote und Schiffe können Tabelle 1 entnommen werden. Das Messboot „BS-D 599“ wurde am ersten Messtag sowohl bei Tidehoch- als auch bei Tideniedrigwasser eingesetzt, wobei am zweiten Messtag der Einsatz der „Bremen 1“ bei Tideniedrigwasser und der Einsatz der „Lesmona“ bei Tidehochwasser erfolgten.

Messboot „BS-D 599“ des Franzius-Instituts		Kombiniertes Feuerwehr- und Polizeischiff „Bremen 1“		Polizeischiff „Lesmona“	
					
Länge	6,10 m	Länge	23,90 m	Länge	16,00 m
Breite	2,50 m	Breite	6,00 m	Breite	5,00 m
Tiefgang	0,75 m	Tiefgang	1,40 m	Tiefgang	1,25 m

Tabelle 1: Eingesetzte Schiffe für die Messfahrten

Die Schiffsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass zu Beginn Geschwindigkeiten mit 3 Knoten gefahren wurden, bei denen keine signifikante Einwirkung infolge schiffinduzierter Wellen auf die am Anleger vertäuten Schiffe zu verzeichnen war, und diese dann sukzessive auf 5, 7, 9 und 11 Knoten gesteigert wurde, bis die Wellen eine Höhe erreicht hatten, bei denen die am Marina-Anleger festgemachten Schiffe großen Einwirkungen infolge der extern verursachten Wellen ausgesetzt waren.

3. AUSWERTUNG UND ERGEBISSE

3.1 Auswertungsverfahren

Die gemessenen Druckschwankungen in den Pegelloggern stellen eine Überlagerung von Tidewelle, Windwellen und Schiffswellen dar. Die das System des Europahafens bestimmende, halbtägige Tide (M2) besitzt eine im Vergleich zu den Quer- und Längswellensystemen sehr lange Periode ($T_T \approx 12 \text{ h } 25 \text{ min}$), wohingegen Windwellen überwiegend aus lokal erzeugtem Seegang entstehen und eine wesentliche kürzere Periode besitzen, die auf Grund der in Frage kommenden Windeinwirkungslängen und -dauern maximal etwa $T_W \leq 1\text{-}2 \text{ s}$ beträgt. Die ggf. Resonanz auslösenden Quer- und Längswellen im Hafenbecken heben sich also deutlich von den hier genannten weiteren Wellensystemen ab. Die Schiffswellen wiederum stellen eine Überlagerung mehrerer, unterschiedlicher Wellensysteme dar und setzen sich aus Komponenten der Primär- und Sekundärwellensysteme zusammen. Auf Grund dieser unterschiedlichen Perioden der drei Wellensysteme sind die zu untersuchenden Schiffswellen in den Zeitreihen deutlich zu erkennen. Dennoch erfolgt die Auswertung der Wasserspiegelauslenkungen im Hafenbecken anhand von vorab gefilterten Messdaten, um das systembedingte Rauschen der Messsensoren und -verstärker sowie den langfristigen Trend infolge der Tidecharakteristik zu entfernen.

Innerhalb der Auswertung wurden zunächst maximale sowie signifikante Wellenhöhen und Peak-Perioden der schiffsinduzierten Wellen jeder einzelnen Messfahrt hinsichtlich der unterschiedlichen Schiffstypen sowie Schiffsgeschwindigkeiten analysiert. Um im Weiteren bewerten zu können, ob sowohl in Quer- als auch in Längsrichtungen Reflexionen entstanden sind, die hinsichtlich ihrer Frequenz mit der Eigenfrequenz des Hafenbeckens übereinstimmen und somit die Möglichkeit von Resonanzen und damit die Entstehung einer stehenden Welle besteht, wurden die in einer Zeitreihen vorkommenden Frequenzen untersucht. Zunächst sind dabei die Oszillationen und Reflexionen infolge der Schiffsfahrt hinsichtlich Frequenz analysiert und mit der Eigenfrequenz des Hafenbeckens in Querrichtung gegenübergestellt worden. Anschließend erfolgte die Untersuchung hinsichtlich der Entstehung von Resonanzen in Querrichtung sowie in Längsrichtung des Hafenbeckens infolge der durch die Schiffsfahrt verursachten Wasserverdrängung.

3.2 Ergebnisse

Für die am Anleger festgemachten Schiffe ist insbesondere die maximale Wasserspiegelauslenkung von Bedeutung. Beispielhaft ist daher in Abbildung 3 für die Pegel 30 und 40 jeweils für die drei unterschiedlichen Schiffstypen die maximal in einer Zeitreihe aufgetretene Wellenhöhe H_{max} über der Schiffsgeschwindigkeit v_S dargestellt. Generell wird hieraus ersichtlich, dass bei Schiffsgeschwindigkeiten bis zu 5 Knoten keine schiffsinduzierten Wellen ausgemacht werden können und dass mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit ab 7 Knoten die Wellenhöhen konsequenterweise ansteigen. Die maximalen Wellenhöhen H_{max} ergaben sich am ersten Messtag für „BS-D 599“ mit 0,398 m bei 9 Knoten und am zweiten Messtag für „Bremen 1“ mit 0,374 m bei 9 Knoten sowie für „Lesmona“ mit 0,336 m ebenfalls bei 9 Knoten. Trotz der unterschiedlich eingesetzten Schiffstypen kann festgehalten werden, dass sich vergleichbare maximale Wellenhöhen sowohl bei Tideniedrig- als auch bei Tidehochwasser ergeben.

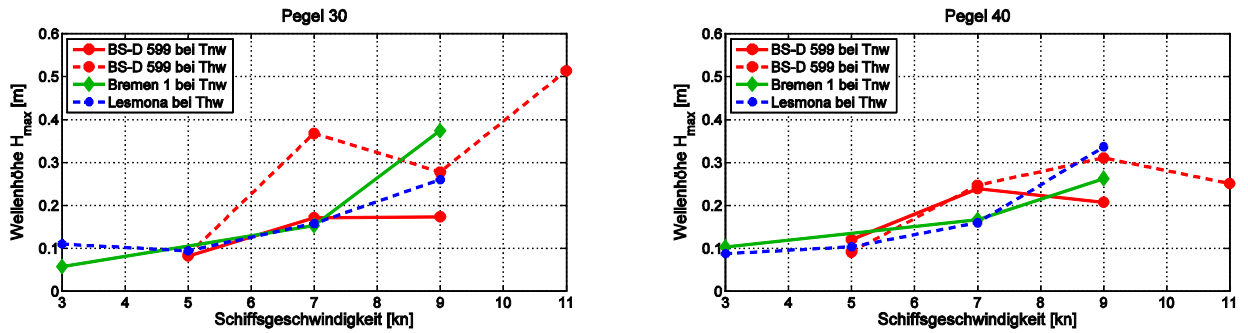


Abbildung 3: Darstellung der maximalen Wellenhöhe H_{max} gegenüber der Schiffsgeschwindigkeit v_s für die Pegel 10 bis Pegel 40

Um beurteilen zu können, ob mögliche Resonanzen bei diesen Messfahrten aufgetreten sind, werden die Zeitreihen der Messfahrten hinsichtlich der Wellenhöhen untersucht, wofür eine Reflexionsanalyse durchgeführt wird. Hierfür ist der Reflexionskoeffizient C_r zu berechnen, der sich aus dem Verhältnis der reflektierten Wellenhöhe H_r zur Eingangswellenhöhe H_i ergibt. Bei der Berechnung des Reflexionskoeffizienten C_r konnte festgestellt werden, dass sich Wellenhöhen H_r ergaben, die bis zu 75 % höher waren als die Eingangswellenhöhe H_i . Im Rahmen der Genauigkeit der Berechnungen z. B. aufgrund der Mittelung der Wassertiefe im Hafenbecken, konnte für diese Zeitreihen festgestellt werden, dass schiffsinduzierten Wellen mit entsprechenden Frequenzen auftraten, die mit den Höher-Harmonischen der Eigenfrequenz des Hafenbeckens in Querrichtung übereinstimmten. Beispielhaft ist hierfür in Abbildung 4 die Gegenüberstellung der Frequenzen aus schiffsinduzierten Wellen mit den höher-harmonischen Eigenfrequenzen $n= 1-15$ des Hafenbeckens in Querrichtung dargestellt.

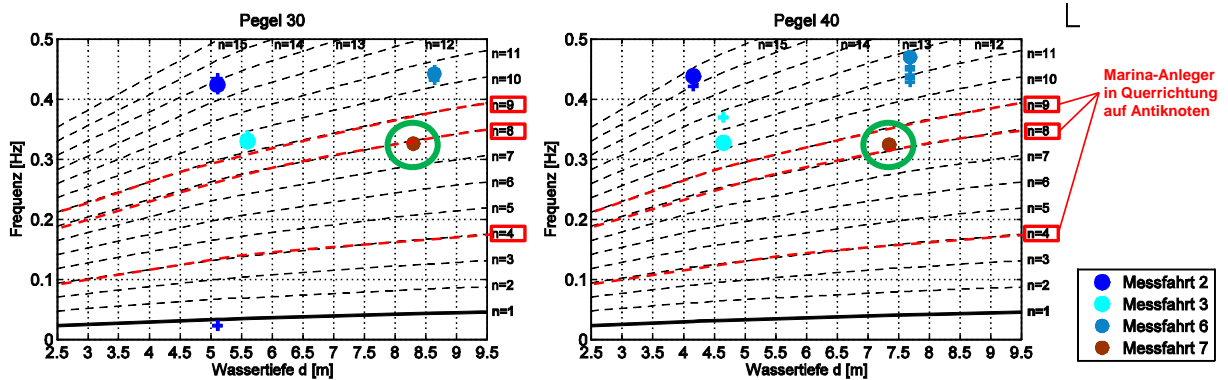


Abbildung 4: Messtag 2: Gegenüberstellung der Frequenzen schiffsinduzierter Wellen mit den Eigenfrequenzen $n= 1-15$ des Hafenbeckens in Querrichtung

Es ist zu erkennen, dass die Frequenzen der schiffsinduzierten Wellen der Messfahrt 7 sowohl am Pegel 30 als auch am Pegel 40 mit der höher-harmonischen Eigenfrequenz $n=8$ des Hafenbeckens in Querrichtung übereinstimmt, bei denen der Marina-Anleger auf einem Antiknoten und damit im Bereich maximaler Wellenauslenkung liegt. Wenn Resonanzen entstehen, erfahren hierbei die sich am Anleger befindlichen Schiffe verstärkte Belastungen in vertikaler Richtung infolge der sich überlagernden Wellen. Insbesondere bei der Messfahrt 7 wurde festgestellt, dass die reflektierten Wellen H_r über einen längeren Zeitraum (ca. 300 Sekunden) größer waren als die Eingangswellenhöhe H_i und somit die Reflexionen über lange Zeit im Hafenbecken anhielten, was auch mit den Beobachtungen während der

Messfahrten übereinstimmt, da sich die Beruhigung der Wasserspiegeloberfläche insbesondere am Ende des Hafenbeckens nur sehr langsam einstellte.

Bei der Analyse der Wellenentstehung infolge der Wasserverdrängung durch die Schiffe und damit der Auswirkung des Primärwellensystems auf eine mögliche Entstehung von Resonanzen in Querrichtung des Hafenbeckens wurde festgestellt, dass die Frequenz der Primärwellen mit wenigen Ausnahmen in der Nähe der Grund-Eigenfrequenz $n=0$ des Hafenbeckens liegt. Jedoch kann keine Erhöhung der Wellenhöhe infolge von Überlagerungen und damit einer möglichen Entstehung von Resonanzen erkannt werden. Auch sind nur sehr geringe Wellenhöhen bis maximal 0,03 m gemessen worden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Wellenhöhen der Querschwingungen unabhängig von der Schiffsgeschwindigkeit der Messfahrten sind. Dies kann auch für die Wellenentstehung mit maximalen Wellenhöhen von 0,15 m in Längsrichtung des Hafenbeckens geschlussfolgert werden. Es ist anzunehmen, dass die in dieser Messkampagne eingesetzten Schiffe infolge ihres geringen Querschnittes gegenüber des sehr viel größeren Querschnittes des Hafenbeckens auf die Wasserverdrängung einen zu geringen Einfluss haben, so dass keine Resonanzen in Quer- als auch in Längsrichtung erzeugt werden können.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Für den tidebeeinflusste Europahafen im Stadtgebiet von Bremen wurden im Rahmen von in-situ-Messungen im Hafenbecken die derzeitige Schiffswellenausbreitung und Anregungsmechanismen infolge Resonanzen ermittelt. Für die Erzeugung der schiffsinduzierten Wellen wurde das institutseigene Messboot „BS-D 599“ und das kombinierte Feuerwehr- und Polizeischiff „Bremen 1“ sowie das Polizeischiff „Lesmona“ eingesetzt. Zur Aufzeichnung der Wasserspiegelschwankungen infolge Wellen sind insgesamt vier Druckmessdosen längs an der nördlichen Spundwandseite des Hafenbeckens installiert worden. Generell wurde festgestellt, dass sich unabhängig vom eingesetzten Schiffstyp schiffsinduzierte Oszillation und Reflexionen erst für Schiffsgeschwindigkeit größer als 5 Knoten ergeben haben und mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit ansteigen. Trotz der unterschiedlich eingesetzten Schiffstypen und Rumpfformen ergeben sich vergleichbare maximale Wellenhöhen. Um im Weiteren bewerten zu können, ob sowohl in Quer- als auch in Längsrichtungen Reflexionen entstehen, die hinsichtlich ihrer Frequenz die Eigenfrequenz des Hafenbeckens treffen und somit die Möglichkeit einer stehenden Welle besteht, wurden die in einer Zeitreihen vorkommenden Frequenzen untersucht. Es ist zu erkennen, dass im Rahmen der Genauigkeit der Berechnungen einige Frequenzen der schiffsinduzierten Wellen mit der Eigenfrequenz des Hafenbeckens in Querrichtung übereinstimmen. Bei der Berechnung des Reflexionskoeffizienten C_r konnte festgestellt werden, dass sich Wellenhöhen H_r ergeben, die bis zu 75 % höher sind als die Eingangswellenhöhe H_i . Es kann geschlussfolgert werden, dass eine Überlagerung von Wellen und damit eine mögliche Resonanzentstehung infolge der Hafengeometrie auftreten kann, welche demzufolge unabhängig von der Schiffsgeschwindigkeit ist. Entstehende Reflexionen infolge schiffsinduzierter Wellen sind sehr komplexer Natur, insbesondere durch die kreuzförmige Überlagerung am Ende des Hafenbeckens. Dieses komplexe Wellensystem lässt sich im Rahmen der durchgeführten in-situ-Messungen mit einer begrenzten Anzahl an eingesetzten Messgeräten punktuell erfassen. Die daraus resultierende Möglichkeit der Entstehung von Resonanzen ist jedoch nur begrenzt nachweisbar.