

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Kösters, Frank; Uliczka, Klemens; Böttner, Carl-Uwe; Kastens, Marko
Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße im
Küstenbereich – Ein Überblick wissenschaftlicher
Methoden

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102496>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kösters, Frank; Uliczka, Klemens; Böttner, Carl-Uwe; Kastens, Marko (2017):
Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße im Küstenbereich – Ein Überblick
wissenschaftlicher Methoden. In: BAWMitteilungen 100. Karlsruhe: Bundesanstalt für
Wasserbau. S. 147-169.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße im Küstenbereich – Ein Überblick wissenschaftlicher Methoden

Interaction of Ships and Waterways in Coastal Areas – A Review of Scientific Research Methods

Dr. rer. nat. Frank Kösters, Dr.-Ing. Klemens Uliczka, Dr.-Ing. Carl-Uwe Böttner, Marko Kastens, Bundesanstalt für Wasserbau

Die Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße ist sowohl ein wesentlicher Faktor für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs, als auch für die wirtschaftliche Unterhaltung der Seehafenzufahrten. Für den Küstenbereich sind die damit verbundenen Fragestellungen in der Fachaufgabe „Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße“ (WSS) gebündelt. Anhand des Squats, des geschwindigkeitsabhängigen Absenkens des Schiffs in dem selbst erzeugten Wellensystem, werden die eingesetzten wissenschaftlichen Methoden aus Messungen in der Natur, Messungen im hydraulischen Modell, Untersuchungen im numerischen Modell und mit dem Schiffsführungssimulator vorgestellt.

The interaction of ships and waterways is a main factor for ensuring safety and ease of navigation and the economic maintenance of the approach channels. For coastal areas scientific questions related to this task are bundled in the task “Interaction between seagoing ships and sea waterways” (WSS). Taking squat as an example, the scientific methods applied are illustrated. These include measurements in the field and in the hydraulic model, numerical model investigations and the application of ship handling simulations.

1 Einleitung *Introduction*

Die Zunahme des Güterverkehrs auf den Seeschiffahrtsstraßen in den letzten Jahrzehnten hat zur Fahrt größerer und stärker motorisierter Schiffe auf den Seehafenzufahrten geführt. Dadurch hat die Fragestellung der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße an Bedeutung gewonnen und ist bei wasserbaulichen Fragestellungen zu betrachten. Die Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße ist für den Bereich

der Seeschiffahrt in Bild 1 schematisch dargestellt. Die Abbildung zeigt die zu betrachtenden Bereiche für den Verkehrswasserbau, die die Belastung der Ufer (1), die Belastung der Sohle (2), die Beeinflussung der Schiffsdynamik (3) und die gegenseitige Beeinflussung der Schiffe (4) umfassen.

Dieser Artikel gibt im Folgenden einen Überblick über die im Themenfeld Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße (WSS) relevanten Fragestellungen und die bei deren Bearbeitung eingesetzten Methoden. Der Squat¹ soll hier als exemplarisches, allen Methoden und Fragestellungen gemeinsames Phänomen dienen. Abschnitt 2 stellt die historische Entwicklung der Fachaufgabe WSS dar, Abschnitt 3 erläutert Messungen und Untersuchungen in der Natur, die z. B. zur direkten Bestimmung des momentan auftretenden Squats eingesetzt werden. Im vierten Abschnitt werden Untersuchungen im physikalischen Modell vorgestellt, im fünften Abschnitt Untersuchungen im numerischen Modell. Im sechsten Abschnitt erfolgt dann die Darstellung der Weiterentwicklung bei der Methode der Schiffsführungssimulation.

2 Rückblick zur historischen Entwicklung der Fachaufgabe WSS *Review on the historical development of the task WSS*

Die heutigen Arbeiten der BAW zur Fachaufgabe WSS können sich in ihrer Tradition noch auf das Fachwissen aus der Zeit der Vorgängerorganisation der BAW, der 1903 gegründeten Königlichen Versuchsanstalt für

¹ Squat: Geschwindigkeitsabhängige Absenkung des Schiffs mit dem selbst erzeugten, langperiodischen Wellensystem = Verringerung der Kielfreiheit

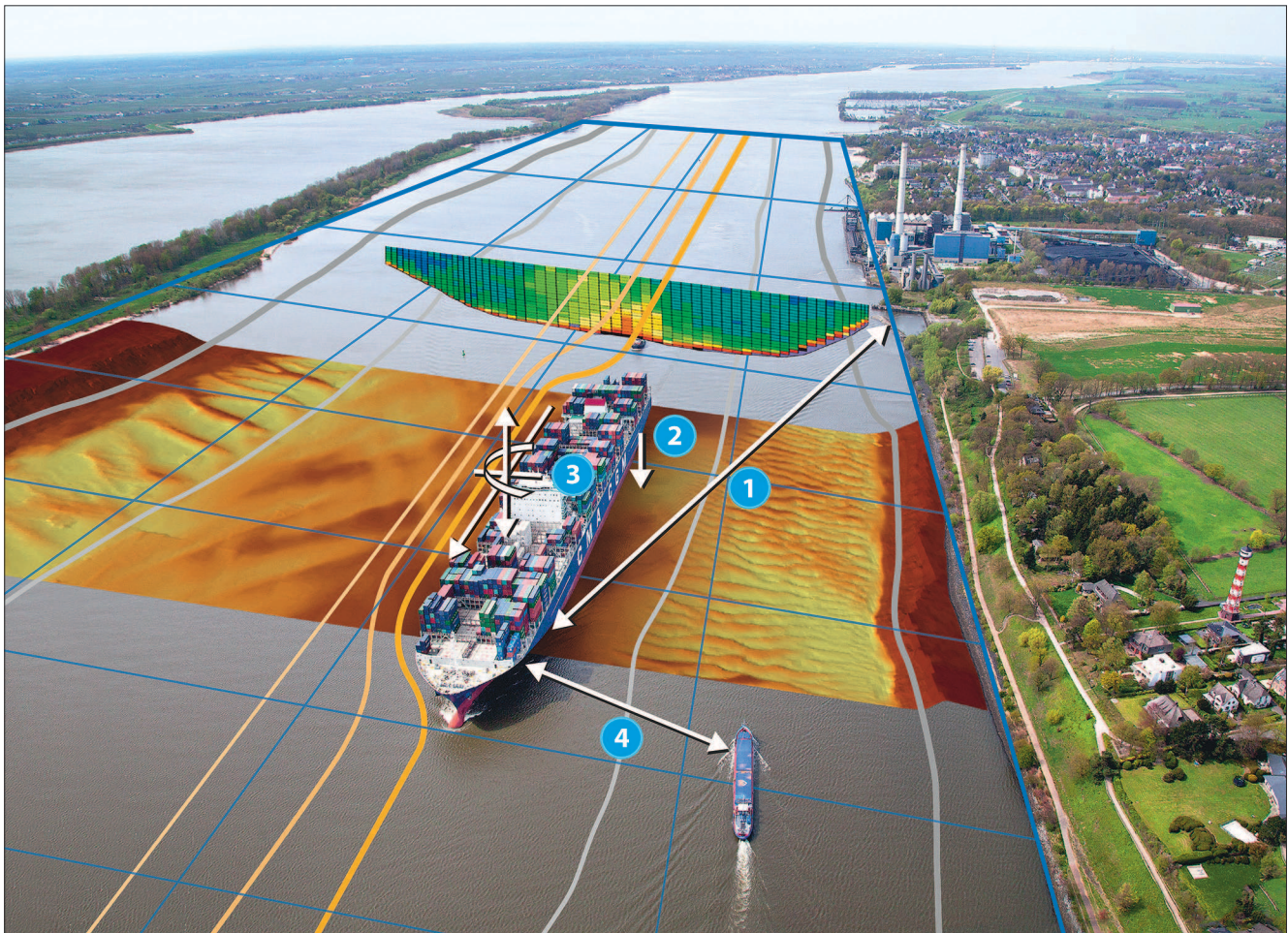


Bild 1: Schematische Darstellung der Interaktion von Schiff und Wasserstraße mit schiffserzeugter Belastung der Ufer (1) und der Sohle (2), Beeinflussung der Schiffsdynamik (3) und der Schiff-Schiff Interaktion (4)

Figure 1: Schematic representation of the interaction of ship and waterway showing ship-induced stress on banks (1) and the river bed (2), influence on ship dynamics (3) and ship-ship interaction (4)

Wasserbau und Schiffbau in Berlin, beziehen (Oebius, 1998). Der Name der damaligen Institution wies schon auf die erforderliche, enge interdisziplinäre Zusammenarbeit der beiden Fachdisziplinen Wasserbau und Schiffbau hin, die mit der Veröffentlichung des damaligen Leiters Regierungs- und Baurat Krey zur „Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser“ dokumentiert wurde (Krey, 1913).

Die Fachaufgabe WSS entstand, als vor etwa 25 Jahren die Fahrt größerer und stärker motorisierter Schiffe auf annähernd gleichbleibenden Seeschiffahrtsstraßen Prognosen zur zukünftigen Uferbelastung erforderten. Die schiffserzeugten Wellen und Strömungsbelastungen wurden zunächst als Eingangsgröße für die Bemessung und Überprüfung der Stabilität der Ufersicherungen in Verbindung mit analytischen und empirischen Ingenieuransätzen prognostiziert und anhand von Be-

weissicherungsmessungen in der Natur teils bestätigt. Nach diesen Messungen in der Natur wurden erste Systemversuche in einem kleinmaßstäblichen Modell im Wellenbecken der BAW Dienststelle Hamburg (BAW-DH) mit der Nachbildung eines schiffserzeugten Rollbrechers zur Optimierung von Ufersicherungen und der Bemessung von Schüttsteinvorlagen durchgeführt (Maßstab 1 : 10; bewegliches Sohlenmaterial).

Mit den Planungen der Ausbaumaßnahmen der Zufahrten u. a. zu den Seehäfen Rostock und Hamburg in den 90er-Jahren rückten die schiffserzeugten Belastungen auch in den Fokus der öffentlich-rechtlichen Plangenehmigungsverfahren, sodass Modellversuche in Teilmodellen mit Maßstäben von 1 : 40 zur Grundlage der Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen wurden. Umfangreiche Beweissicherungsmessungen in der Natur zur Erfas-

sung lokaler Schiffswellenbelastungen auf Ufer, Kaianlagen und Deckwerke nach dem Ausbau und nach veränderter Flottenstruktur schlossen sich u. a. am Seekanal Warnemünde, der Außenweser bei Imsum und entlang der Unterelbe an, da u. a. der Interessenskonflikt zwischen optimaler wirtschaftlicher Nutzung der Seeschiffahrtsstraßen und deren Anliegern wie z. B. Werften und Sportboothäfen zu Kontroversen und Klagen über schiffsinduzierte Schäden führte.

Die Entwicklung von numerischen Verfahren im Schiffbau für Tiefwasserbedingungen wurde hinsichtlich eines möglichen Einsatzes als Prognosemethode von schiffserzeugten Belastungen bei Ausbauvorhaben verfolgt und durch die Kooperation mit internationalen Partnern für Flachwasserbedingungen geprüft (Nwogu, 1997; Chen und Uliczka, 1999). Auch wenn die Ergebnisse numerischer Modellverfahren vorerst nicht die Aussageschärfe der hydraulischen Modellversuche erreichten, wurde im Rahmen von Forschungs und Entwicklungsvorhaben der BAW die Weiterentwicklung verschiedener numerischer Modellverfahren u. a. bei der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD), jetzt Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST), sowie später mit dem Büro FutureShip, Potsdam, sowie dem Germanischen Lloyd, Hamburg, unterstützt, um langfristig mit dieser Methode die hydraulischen Modellversuche, wenn nicht zu ersetzen, so zumindest zu ergänzen. Seit 2010 werden in der BAW-DH numerische Verfahren zur Bearbeitung von Fragenstellungen der WSS eingesetzt.

Mit erneuten Anträgen der Seehäfen zur Anpassung der Seeschiffahrtsstraßen an den expandierenden Schiffsverkehr Anfang dieses Jahrhunderts wurde neben der wiederkehrenden Frage der möglichen ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungsänderungen auch die Überprüfung der Bemessungsansätze zur erforderlichen Fahrrinntiefe und hier besonders der bisher verwendete Squat-Ansatz diskutiert. Mit der zunehmenden Länge und Breite der bemessungsrelevanten Containerschiffe und deren möglicherweise verändertem Squatverhalten wurde der Augenmerk verstärkt auf die geschwindigkeitsabhängige Schiffsdynamik bei Revierfahrt gerichtet und dazu die große Versuchshalle der BAW-DH mit einem festen Schiffswellenbecken von 100 m Länge und 35 m Breite für eine maximal mögliche „Flachwassertiefe“ von 0,7 m ausgestattet.

Die umfassenden Systemversuche im Schiffswellenbecken zum Einfluss der Schiffslänge, der Unterwasserbathymetrie sowie des Wasserstraßenquerschnitts auf das Squatverhalten verschiedener, damals außergewöhnlich großer, Containerschiffe wurden annähernd zeitgleich durch ein umfangreiches Messprogramm auf der Unterelbe begleitet und die Ergebnisse der Modellversuche zusätzlich fachlich abgesichert. Dabei wurde insbesondere der theoretisch zwar bekannte, aber jetzt aufgrund der größeren Schiffsbreiten immer wesentlichere Einfluss des Querschnittsverhältnisses (Wasserstraßenquerschnitt zum eingetauchten Hauptspantquerschnitt) auch für den Squat nachgewiesen, der eine Überprüfung der Fahrrinnenbemessungsformel und die Verwendung einer abschnittsweise angepassten Squatformel erforderte. Die BAW empfahl dementsprechend die kontinuierliche Überprüfung der Fahrdynamik der aktuell verkehrenden Fahrzeuge in den Seeschiffahrtsstraßen als ständige Aufgabe der WSV, was etwa 10 Jahre später mit einem mehrjährigen Messprogramm auf der Unter- und Außenelbe zur Aktualisierung des Tidefahrplanprogramms Tideelbe von den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern Hamburg und Cuxhaven umgesetzt wurde. In diesem Rahmen leistet die BAW die fachliche Beratung sowie die Qualitätssicherung der Ergebnisse der durch Dritte durchgeführten Messkampagne.

Mit der Beteiligung der BAW an der Erstellung der verschiedensten Fachgutachten zu ausbaubedingten Änderungen, u. a. der schiffserzeugten Belastungen der Seeschiffahrtsstraßen, wurde auch die fachliche Absicherung des Bemessungsverfahrens der Fahrrinnenbreite u. a. unter Einsatz der Schiffsführungssimulation hinterfragt. Ausgewählte, für Aus- und Fortbildung der Nautiker zertifizierte, Simulatoren in Nordeuropa wurden, mit Unterstützung eines langjährig in der Schiffsführungssimulation erfahrenen Nautikers, im Rahmen eines Evaluierungsprozesses aufgesucht und mit deren Betreibern mehrmals ein international besetzter Workshop bei der BAW-DH durchgeführt. Im Wesentlichen wurden daraus Konzepte zur Optimierung der Schiffsführungssimulation für eine Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse u. a. für die Belange der WSV erarbeitet (von Morgenstern, 2007a, 2007b, 2008). Die fachliche Konsequenz war zum einen die Beantragung und Beschaffung eines Schiffsführungssimulators bei der BAW zur Weiterentwicklung der Schiffsführungssimulation für die be-

sonderen Belange der WSV sowie der BAW-interne Auftakt einer hardware-unabhängigen Hinterlegung der fahrdynamischen Module eines Simulators mit gemessenen oder berechneten Daten bei Revierfahrtbedingungen. Zum anderen wurde das Modellversuchswesen, neben der bisherigen Erfassung der schiffserzeugten Belastungen und der vertikalen Schiffsdynamik, zusätzlich auf die Messung von fahrdynamischen Kräften und Momenten in Maßstabmodellen infolge der Schiff-Ufer- sowie der Schiff-Schiff-Interaktion ausgerichtet. Die Ergebnisse der entsprechenden Versuche wurden im Folgenden nicht nur direkt im Rahmen von Projekten verwendet, sondern bilden auch die Basis für die Validierung der numerischen Verfahren und die Schiffsführungssimulation. Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, die Schiffsführungssimulation als weiteres Werkzeug zur Bearbeitung von Fragen der WSS zu etablieren.

3 Messungen in der Natur *Field measurements*

3.1 Einleitung *Introduction*

Messungen in der Natur sind für Untersuchungen zur WSS in unterschiedlichen Bereichen notwendig. Diese umfassen insbesondere die Bestimmung der IST-Situation schiffserzeugter Belastungen und dienen unter anderem auch der Beweissicherung nach durchgeführten Ausbaumaßnahmen. Weiterhin erfolgt die Messung des dynamischen Fahrverhaltens der Schiffe im Revier. Im Rahmen von Forschungsvorhaben werden auch weitergehende Fragestellungen wie z. B. der Einfluss der schiffserzeugten Strömungen und Wellen auf den Sedimenttransport untersucht.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass Untersuchungen in der Natur nur den Ist-Zustand beschreiben können oder als Grundlage für weitergehende Betrachtungen in Verknüpfung mit Systemversuchen dienen. Eine Prognose, z. B. zum schiffsdynamischen Verhalten größerer, noch nicht verkehrender Fahrzeuge im Tideästuar oder zur schiffserzeugten Belastung durch zukünftig verkehrende Fahrzeuge bei Revierfahrt, bedarf des Einsatzes von z. B. hydraulischen Modellen nach Stand von Technik und Wissenschaft.

3.2 Schiffserzeugte Belastungen *Ship-induced loads*

Belastbare Aussagen zu lokalen schiffserzeugten Wellen und Strömungsbelastungen von Unterwasserböschungen, Ufer und Strombauwerken sowie von Deichsielen, Sportboothäfen und Kaianlagen an Seeschiffahrtsstraßen können nur anhand von Messungen in der Natur getroffen werden. Ausschlaggebend hierfür sind zum einen inhomogene Revierbedingungen und zum anderen Unterschiede in der Flottenstruktur des jeweiligen Seehafens. Entsprechende Untersuchungen erfordern in der Regel mehrwöchige Messkampagnen, um eine hinreichende Anzahl von Fahrzeugen aller Verkehrsklassen als repräsentative Stichprobe zu erfassen.

Aufgrund der Erfahrungen der BAW mit selbst durchgeführten Messungen zur schiffserzeugten Belastung von Seeschiffahrtsstraßen, u. a. an der Tideelbe bei Schulau (BAW, 1992), an der Außenweser bei Imsum (BAW, 1994), sowie an der Trave unterhalb Lübecks (BAW, 1996; Bild 2), war es möglich, für zukünftige Aufträge die zu erbringende Leistung detailliert zu beschreiben und an Dritte zu vergeben.



Bild 2: Messkonfiguration zur Erfassung der schiffserzeugten Belastungen an der Trave (BAW, 1996)
Figure 2: Measurement configuration to determine ship-induced loads at the river Trave (BAW, 1996)

Beispiele für die Durchführung von Messkampagnen zur Erfassung schiffserzeugter Belastung von Seeschiffahrtsstraßen sind z. B. Beweissicherungsmessungen an der Außenweser bei Imsum (IM+P, 2002), Messkampagnen als Grundlage für BAW-Gutachten an der Unterweser (IMS, 2006) oder an der Unterelbe bei Hollerwettern (if, 2006). Bei den Vergaben dieser Mess-

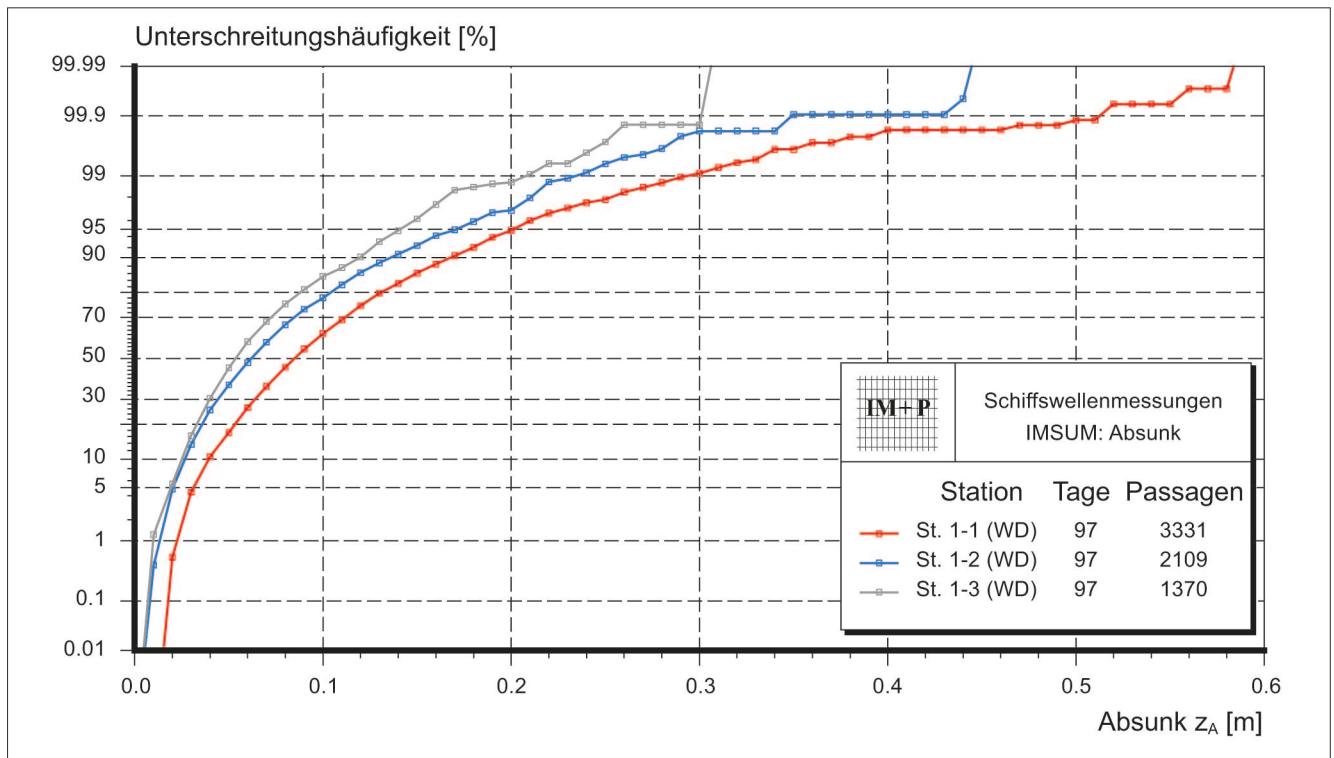


Bild 3: Unterschreitungshäufigkeit des örtlichen schiffserzeugten, langperiodischen Absunks an der Außenweser bei Imsum (aus IM+P, 2002)

Figure 3: Probability distribution of the height of local ship-induced long-periodic primary waves at the outer Weser estuary in the area of Imsum (IM+P, 2002)

kampagnen an Dritte war die BAW nur noch beratend und qualitätssichernd für die beauftragenden Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter tätig.

In den Ergebnisberichten der verschiedenen Ingenieurbüros wurden zur Beschreibung des Ist-Zustands der schiffserzeugten Belastung einer Wasserstraße die örtlichen kennzeichnenden Größen wie z. B. das langperiodische Primärwellensystem (Absunk und Primärwelle) sowie die kurzperiodische Sekundärwellenhöhe u. a. als Unterschreitungswahrscheinlichkeit über einen repräsentativen Zeitraum aufgetragen. Als Beispiel dazu sind in Bild 3 Ergebnisse zum Absunk der Beweissicherungsmessungen an der Außenweser bei Imsum dargestellt (IM+P, 2002).

Wurden die Ergebnisse der Messkampagnen vorerst lediglich zur Beschreibung des Ist-Zustands der schiffserzeugten Belastungen für die BAW-Gutachten herangezogen, entwickelte sich bei der BAW aufgrund der Diskussion zwischen den verschiedenen Fachbehörden der Ansatz, diese Unterschreitungswahrscheinlichkeiten, in der Verknüpfung mit Ergebnissen aus Systemversuchen in kleinmaßstäblichen hydraulischen

Modellen, als Grundlage zur Prognose der zukünftig zu erwartenden ausbaubedingten Änderungen dieser Unterschreitungshäufigkeiten zu verwenden. Vorausgesetzt war dabei ein verändertes Fahrverhalten und Beladungsverhalten auch von Fahrzeugen, die von der Fahrrinnenvertiefung aufgrund ihres deutlich geringeren Tiefgangs nicht unmittelbar betroffen waren. Dieses auf Messungen in der Natur basierende Vorgehen wurde erstmals für die gutachterliche Bearbeitung der Vertiefung der Außenems angewandt, um den möglichen „worst case“-Einfluss einer Ausbaumaßnahme auf die ganzheitliche Belastungsänderung durch die gesamte künftige Flottenstruktur zu prognostizieren (BAW, 2012).

Als Beispiel ist in Bild 4 für den schiffserzeugten Absunk diese „worst case“-Betrachtung für große Fahrzeuge mit Tiefgängen t über $t > 7,5$ m an den verschiedenen Prognoseabschnitten der Außenems grafisch dargestellt. Basis der prognostizierten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten waren die vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Emden beauftragten Messungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenems (IMS, 2010) sowie Systemversuche mit einem Modell des Bemessungsschiffs im Schiffswellenbecken der BAW-

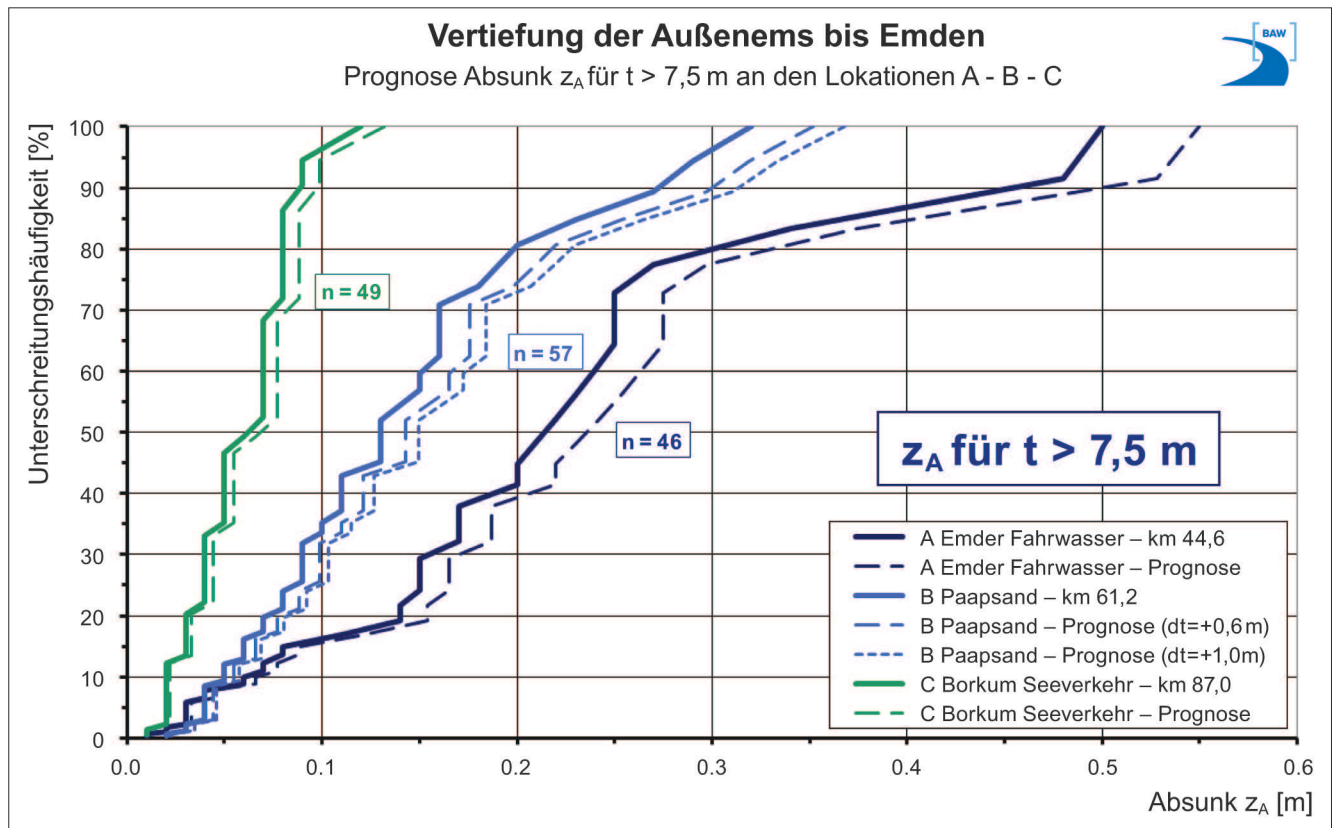


Bild 4: Prognose der Unterschreitungshäufigkeiten des ausbaubedingten Absunks für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m an den Lokationen A (Emder Fahrwasser), B (Paapsand) und C (Borkum) (BAW, 2012)

Figure 4: Forecast of probability distribution of drawdown for ships with $t > 7.5$ m at locations A (Emden navigation channel), B (Paapsand) and C (Borkum) due to adaption measure (BAW, 2012)

DH zur Ermittlung der geschwindigkeitsabhängigen prozentualen Belastungsänderungen.

Zur Prognose von ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen an Seeschiffahrtsstraßen reichen die Messungen in der Natur jedoch alleine nicht aus. Vielmehr ist hierfür folgendes Vorgehen zielführend:

- Erfassung des Ist-Zustands der schiffserzeugten Belastungen für charakteristische Abschnitte einer Seeschiffahrtsstraße über einen repräsentativen Zeitraum sowie Analyse der Flottenstruktur im Ist-Zustand.
- Prognose der Veränderung der Flottenstruktur hinsichtlich der maximalen Größen der Fahrzeuge und künftig am häufigsten verkehrenden Fahrzeuge zur Abschätzung der Belastungszunahme durch den Gesamtverkehr.
- Systemstudien im hydraulischen Modell nach Stand der Technik (Experimental Fluid Dynamics, EFD) und/oder numerische Berechnungen nach Stand der Technik (Computational Fluid Dynamics, CFD) zur Prognose der geschwindigkeitsabhängigen prozentualen Änderungen der Belastungskenngrößen durch das Bemessungsschiff sowie des am häufigsten verkehrenden Fahrzeugs.
- Verknüpfung der Prognoseergebnisse auf Grundlage fachwissenschaftlichen Expertenwissens mit den Ergebnissen aus Messungen des Ist-Zustands für die gesamte Flottenstruktur und ggf. ausgewählter maßgeblicher Teilmengen.
- Beweissicherungsmessungen nach der Ausbaumaßnahme über einen repräsentativen Zeitraum.

3.3 Schiffsdynamik im begrenzten Fahrwasser

Ship dynamics in shallow and confined waters

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, trat im Rahmen der neuen Ausbauplanungen neben der vorgestellten ausbaubedingten schiffserzeugten Belastung die Schiffsdynamik der längeren und breiteren Containerschiffe auf den Seeschiffahrtsstraßen in den Vordergrund. Diese wirkt sich maßgeblich auf die erforderlichen Abmessungen der Wasserstraße (Breite und Tiefe der Fahrrinne) aus. Zusätzlich zu umfangreichen kleinmaßstäblichen Systemversuchen in der Versuchshalle der BAW-DH waren zur Akzeptanz und Validierung der Modellergebnisse Messungen in der Natur zu Squat, Trimm und Krängungsverhalten bei Revierfahrt Teil eines Forschungsprojekts.

Mit Unterstützung der Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) zur Kontaktaufnahme mit ausgewählten Reedereien und mit Kenntnis der Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter Hamburg und Cuxhaven sowie der

Lotsenbrüderschaft Elbe wurde eine Messkampagne an der Tideelbe als Forschungsprojekt eingerichtet, bei dem ab den Liegeplätzen im Hafen Hamburg bis zur Reviergrenze in der Nordsee die geschwindigkeitsabhängigen Kenngrößen der Schiffsdynamik erfasst wurden. Nach Stand der Wissenschaft wurden Daten von Precise Differential Global Positioning Systemen (PDGPS) und vom Voyage Data Recorder (VDR) an Bord mit Wasserstands-, Strömungs- und Dichtedaten an ausgewählten Querprofilen des Ästuars zusammen mit numerisch im „hindcast“-berechneten Tidedaten verschnitten (Maushake und Joswig, 2004).

Von Anfang 2003 bis Sommer 2004 wurden 12 Fahrten von zwei Containerschiffstypen, der damaligen Hamburg-Express-Klasse von HAPAG LLOYD (9.500 TEU) sowie der YANG MING LINE (5.500 TEU) begleitet, die Schiffsdynamik erfasst und hinsichtlich der maßgebenden Kenngrößen zur Überprüfung ausgewählter Berechnungsansätze analysiert. Weitergehende Analysen betrafen u. a. das konstruktionspezifische Fahrverhalten moderner Containerschiffe bei eingetauchtem Spiegelheck sowie die Netto-Verkehrsspurbreite

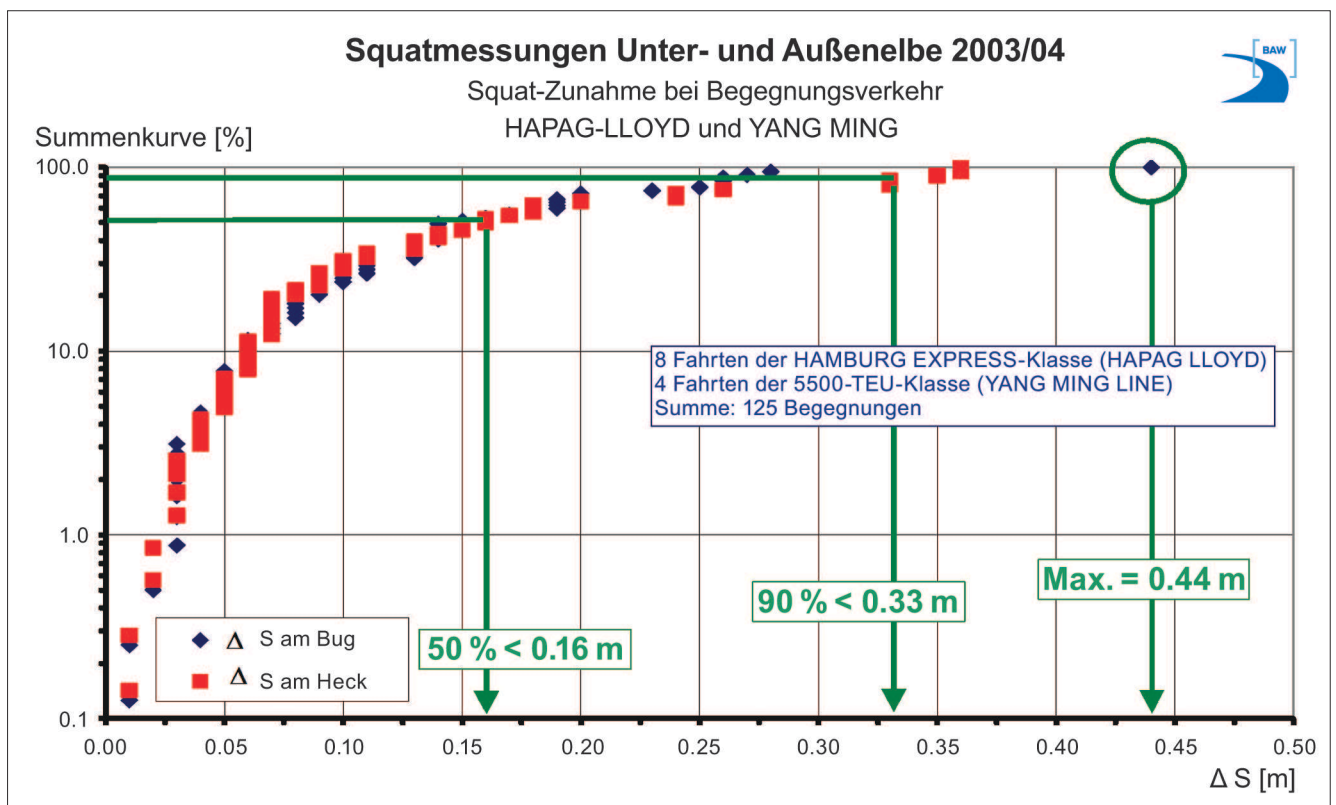


Bild 5: Unterschreitungshäufigkeiten des zusätzlichen Squats bei Begegnungen auf der Unter und Außenelbe bei den in 2003/2004 gemessenen Fahrten (nach Uliczka, Kondziella, 2009)

Figure 5: Probability distribution for additional squat during ship encounters in the lower and outer Elbe estuary based on measurements in 2003/2004 (according to Uliczka/Kondziella, 2009)

der Containerschiffe in Abhängigkeit der Krümmungsradien der Fahrrinne der Tideelbe (u. a. Uliczka und Wezel, 2005).

Die Auswertung von über 120 Schiffsbegegnungen während der Messfahrten zeigte als eine Besonderheit das Maß sowie die damalige Unterschreitungshäufigkeit des zusätzlichen Squats bei Begegnungen auf der Unter- und Außenelbe (Bild 5; nach Uliczka und Kondziella, 2009).

Die damalige internationale Einführung von Transpondern für das Automatische Identifikationssystem (AIS) für große Seeschiffe und die Überprüfung der daraus resultierenden verkehrswasserbaulichen Verwendungsmöglichkeiten gab der BAW grundlegende Anhaltspunkte zu einer späteren intensiven Nutzung dieser AIS-Signale für weitergehende wissenschaftliche Analysen bei verschiedensten Aufgabenstellun-

gen an Seeschiffahrtsstraßen (u. a. Passierabstand zu Messgeräten, Passierabstand Schiff zu Schiff, Analyse der lokalen Flottenstruktur inkl. Fahrverhalten, Geschwindigkeitsband der Fahrzeuge im Revier; u. a. BAW, 2006).

Aufgrund der Erkenntnisse zum fahrdynamischen Verhalten verschiedener Schiffstypen aus der Messkampagne 2003 und 2004 empfahl die BAW, die Erfassung der Fahrdynamik großer Containerschiffe bei Revierfahrt als stetige Fachaufgabe in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zu verankern (Uliczka und Wezel, 2005). So wurde als Grundlage für die Anpassung des Tidefahrplans der Elbe an die Entwicklung der Flottenstruktur 2012 das Projekt „Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von großen und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter und Außenelbe“ vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg unter Beteiligung der BAW an ein Ingenieurbüro ver-

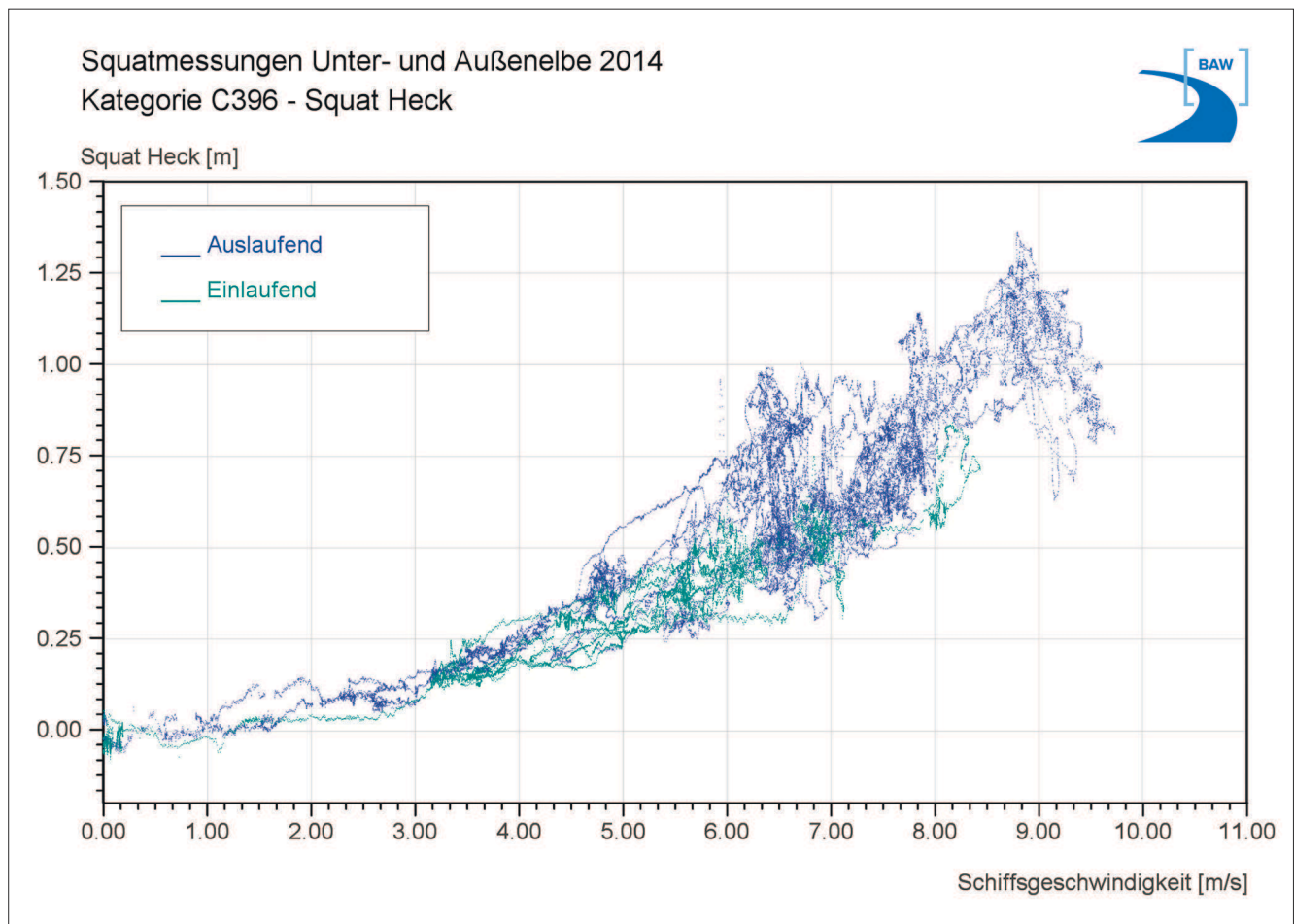


Bild 6: Squat in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser jeweils am Heck von drei Passagen einer AgF-Containerschiffsklasse bei Revierfahrt auf der Unter und Außenelbe
 Figure 6: Squat at stern as function of the ship's speed through water for three passages for a very large container vessel at the outer and lower Elbe estuary

geben. Die BAW agiert dabei als Geschäftsstelle und führt die Qualitätssicherung der Ergebnisse durch. In diesem Projekt wurden zwischen 2012 und 2016 mehr als 21 Messfahrten betreut sowie fachwissenschaftlich begleitet (Behm und Jansch, 2015). Die von WSV und BAW vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen an die Messergebnisse erforderten die Verknüpfung neuester Technologie sowohl zur Erfassung der Schiffsbewegung im Tideästuar durch mehrere Global Navigation Satellite Systeme (GNSS) als auch in der Erfassung der schiffsbegleitenden Strömungsmessung.

Die Notwendigkeit der Aktualisierung des Tidefahrplans für die Elbe verdeutlicht eine Auswertung der BAW im Rahmen ihrer Qualitätssicherung (Bild 6) beispielhaft für drei Passagen außergewöhnlich großer Fahrzeuge (AgF). Mit zunehmender Fahrt durchs Wasser nimmt die vertikale Streuung des maximalen Squat am Heck unverkennbar zu (z. B. ergibt sich für $v_{sdw} = 7 \text{ m/s} = 13,6 \text{ kn}$ ein Squat zwischen $0,27 \text{ m} < S_{HECK} < 1,0 \text{ m}$), was den Einfluss der Querschnittsverhältnisse bei Revierfahrt auf die Schiffsdynamik insbesondere für sehr große Fahrzeuge verdeutlicht. Bei der Verwendung von Berechnungsansätzen zur Erstellung eines Tidefahrplans für die Revierfahrt sehr großer Fahrzeuge, ist dies z. B. durch eine abschnittsweise Anpassung von Vorfaktoren des gewählten Berechnungsansatzes zu berücksichtigen.

Einen Sonderfall der Revierfahrt stellt dabei die Überführung von Werftschiffen dar. Diese wurde beispielsweise mit der damaligen Volkswerft Stralsund und dem WSA Stralsund, im Rahmen der Untersuchungen zum zweiten Ausbau der Ostansteuerung Stralsund betrachtet. Ziel war es, die mit neuartiger Bauform auf Geschwindigkeit optimierten Schiffe hinsichtlich des fahrdynamischen Verhaltens messtechnisch zu begleiten, auszuwerten und darzustellen. Bild 7 zeigt beispielhaft die Überführung eines Containerschiffs.

Durch eine gemeinsame Bewertung der Daten konnten zusätzliche Hinweise zur Bemessung der erforderlichen Fahrrinnenabmessungen der Ostansteuerung Stralsund gewonnen werden.



Bild 7: Überführung eines Werftschiffes in der Ostansteuerung Stralsund

Figure 7: Transfer of a shipyard-built boat in the eastern approach channel of Stralsund

3.4 Weitere Wechselwirkungen bei Revierfahrt

Other interactions in shallow and confined waters

Weitere aktuelle Messungen in der Natur, die im Zusammenhang mit der Fachaufgabe WSS im Rahmen von Forschungs- und Entwicklung (FuE) derzeit von der BAW als Pilotprojekte selbst oder in Kooperation mit Partnern der WSV und von Universitäten bearbeitet werden sind:

- FuE-Projekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen“, Pilotversuch zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Untereibeabschnitt Juelsand: Das Pilotprojekt wird in Zusammenarbeit mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg ausgeführt, wobei die BAW das Monitoring der ertüchtigten Strombauwerke übernommen hat (u. a. Uliczka und Gätje, 2015; BAW, 2015). Neben der kontinuierlichen Erfassung der langperiodischen schiffserzeugten Belastungen an den verschiedenen Bühnenbauwerken werden ausgewählte Bühnen bei jedem Tideniedrigwasser von einem autarken Messpfahl aus mit einem 3D-Scanner vermessen und die zeitabhängigen Strukturänderungen infolge schiffserzeugtem Wellenüberlauf analysiert. Als Kooperationspartner zur Entwicklung des „Automatisierten geodätischen Monitoring von Strombauwerken an der Tideelbe bei Juelsand“ wurde das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg gewonnen (u. a. Tschirschwitz et al., 2016).

- FuE-Projekt „Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen“, Messungen in der Natur im Nahfeld von Schiffspassagen: Im Rahmen der Diskussion des tidebedingten Sediment-Regimes im Elbeästuar stellte sich die Frage nach dem Anteil der immer größer werdenden Fahrzeuge am residuellen Sedimenttransport (BAW, 2011). Das hierzu von der BAW erstellte Forschungskonzept sah u. a. im ersten Schritt Messungen in dem Nordostsee-Kanal (NOK) als stehendes Gewässer vor, um in-situ Messsysteme im „Klarwasser“ zu überprüfen sowie Hinweise zum Prozessverständnis der schiffserzeugten Schwebstoff und Sedimentdynamik zu erhalten (Kondziella et al. 2013; Uliczka und Kondziella, 2013). Im Rahmen eines Forschungsvertrags mit dem Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen wurden die bisher vorliegenden Daten aus Messungen am NOK mit verschiedensten statistischen Verfahren analysiert sowie verschiedene empirisch-analytische Ingenieuransätze als Proxy zur Beschreibung des schiffserzeugten Sedimenttransports geprüft (u. a. Jensen et al., 2015). In einem zweiten Schritt wurden in 2015 an sechs Stationen in der Fahrrinne der Tideelbe unterhalb Hamburgs weitere umfangreiche Messungen von Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Trübung vorgenommen, um schiffserzeugte Ereignisse zum Sedimenttransport im Kontext zum natürlichen tidebedingten Sedimentregime zu bewerten.

4 Untersuchungen im hydraulischen Modell

Hydraulic model investigations

4.1 Einleitung

Introduction

Wurden zur Erfassung des jeweiligen Ist-Zustands in den Seeschiffahrtsstraßen Messungen in der Natur eingesetzt, konnte aufgrund von seit mehr als 100 Jahren anerkannten Modellgesetzen die Methode des hydraulischen Modellversuchs in hinreichendem Maßstab zur Prognose der Wechselwirkung zukünftig verkehrender Seeschiffe mit einer entsprechend anzupassenden Seeschiffahrtsstraße verwendet werden.

Die Anforderungen aus der WSV führten beim hydraulischen Modell parallel zu einer ähnlichen Methodenentwicklung wie bei den Messungen in der Natur: Stand vorerst die Prognose schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastung von Uferdeckwerken und Hafenanlagen aufgrund von Ausbaumaßnahmen im Fokus, lag der Schwerpunkt anschließend mit dem querschnittsabhängigen Squat und Trimm auf der vertikalen Schiffsdynamik. Mit Einführung der Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse eines Reviers am Schiffsführungssimulator führte dies zur derzeit vordringlichen Erarbeitung von erforderlichen Grundlegendaten im hydraulischen Modell mit der Erfassung von Querkraften und Giermomenten auf das Schiff u. a. bei der Passage von unterschiedlichen Unterwasserböschungen oder während der Begegnung mit anderen AgF-Fahrzeugen.

4.2 Schiffserzeugte Belastungen

Ship-induced loads

Mit dem Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock waren umfangreiche bauliche Änderungen im Bereich der Molensysteme und des Seekanals Warnemünde erforderlich, sodass zur Prognose der ausbaubedingten Änderung sowohl der Seegangsbedingungen als auch der schiffserzeugten Wellen und Strömungsbelastungen Untersuchungen in einem hydraulischen Modell erforderlich wurden (Bild 8; BAW, 1997).

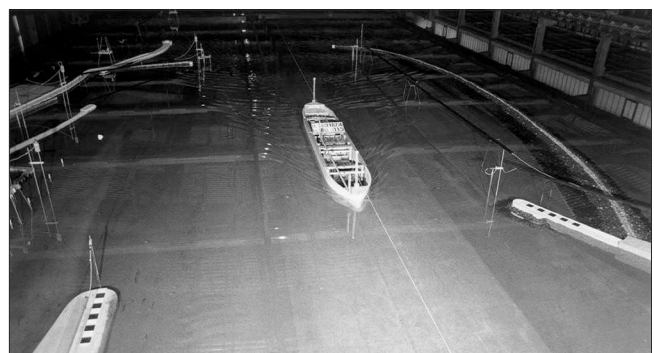


Bild 8: Passage eines konventionellen Massengutschiffs im hydraulischen Modell der Zufahrt zum Seehafen Rostock – Ausbauvariante (Maßstab 1 : 40) (BAW, 1997)

Figure 8: *Passage of a conventional bulk carrier in the hydraulic model of the approach channel of the harbor Rostock – Layout with adaptation (scale 1 : 40) (BAW, 1997)*

Die Seegangs und Fahrversuche im Flächenmodell (ca. 90 m x 40 m; Maßstab 1 : 40) lieferten Ergebnisse u. a. zu den kurz und langperiodischen Änderungen der Schiffswellenbelastungen im Seekanal selbst sowie z. B. im Alten Strom, den Jachthäfen, den Kaianlagen sowie dem Ostufer und dem Werfthafen bei verschiedenen Molenvarianten. Untersucht wurden die geschwindigkeitsabhängigen Belastungsänderungen vor und nach dem Ausbau durch die Passagen von Massengutschiffen zwischen 45.000 dwt² bis 120.000 dwt sowie einer Großfähre an 19 Pegel und sieben Strömungspositionen (BAW, 1997). Variiert wurden zudem die Schiffstiefgänge sowie die Fahrrinntiefe im Seekanal.

Mit der Beauftragung durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel 1997 u. a. zur Bewertung der probeweise eingeführten Begegnungsziffer³ 8 aus wasserbaulicher Sicht sowie zur Abschätzung der Belastung auf das Erosionsverhalten der Böschungen am Nord-Ostsee-Kanal war die Herausforderung gegeben, in einem hydraulischen Modell Begegnungssituationen nachzufahren, um neben der schiffserzeugten Belastung bei Einzelfahrten sowie Begegnungen und Überholvorgängen das Squatverhalten der jeweiligen Verkehrsgruppe (VG) zu ermitteln (BAW, 1998). Einen Eindruck der Messkonfiguration sowie einer Begegnungssituation VG 5 mit VG 4 im Modell des Nord-Ostsee-Kanals (beide $t = 7,5$ m; $v_s \approx 15$ km/h) vermittelt das Foto in Bild 9.

Eines der in der Folgezeit von den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern am Nord-Ostsee-Kanal am häufigsten nachgefragtes Ergebnis war eine im Gutachten der BAW zusammengestellte Tabelle mit den maximalen schiffserzeugten Absunkwerten und Rückstromgeschwindigkeiten für den simulierten Begegnungsverkehr bei verschiedenen Tiefgängen und den jeweils zugelassenen maximalen Schiffsgeschwindigkeiten ($v_s = 12$ km/h und 15 km/h). Die Orientierung an den geschwindigkeitsabhängigen Ergebnissen der schon vorab zugelassenen Begegnungsziffer 7 ermöglichte u. a. die Abschätzung von maximalen schiffserzeugten Belastungen bei weiteren denkbaren Fahrsituationen.

Die Gutachten der BAW zu den ausbaubedingten Ände-

² dwt: deadweight tonnage = Gesamttragfähigkeit

³ Begegnungsziffer: Summe der jeweiligen Verkehrsgruppe (VG) am NOK z. B. BZ 8 = VG3 mit VG5



Bild 9: Begegnungssituation VG 5 (links) und VG 4 (rechts) im hydraulischen Modell des Nord-Ostsee-Kanals (BAW, 1997)

Figure 9: Ship encounter VG5 (left) and VG 4 (right) in the hydraulic model of the Kiel Canal (BAW, 1997)

rungen der schiffserzeugten Belastungen lieferten neben der Angabe der Ist-Größen u. a. Aussagen zu den Belastungsänderungen für „worst-case“-Situationen (u. a. Bemessungsschiff, maximaler Tiefgang bei Thw und Tnw, geringer Passierabstand vom Fahrrinnenrand) als Grundlage für weitergehende UVU⁴-Studien Dritter (u. a. BAW, 2006).

Das aktuelle Prognoseverfahren im Rahmen von Ausbaumaßnahmen sieht vor, dass die in der Natur in charakteristischen Abschnitten gemessenen Unterschreitungshäufigkeiten der schiffserzeugten Kenngrößen mit wiederum auf der sicheren Seite liegenden geschwindigkeitsabhängigen prozentualen Änderungen aus Systemstudien im hydraulischen Modell multipliziert werden, z. B. angewandt im Rahmen der Untersuchungen zur geplanten Außenems-Vertiefung (BAW, 2012).

Neben der Ermittlung der geschwindigkeitsabhängigen Belastungsgrößen des Bemessungsschiffs bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt (Bild 10; PanMax-Schiff $c_b = 0,6$), wurde der Einfluss der Tiefgangszunahme ohne und mit Vertiefungsmaßnahmen, der Einfluss der Völligkeit vergleichbarer Schiffe sowie die Wirkung von Änderungen des Wasserstands und der Kiefreiheit ermittelt.

⁴ UVU: Umwelt-Verträglichkeits-Untersuchung

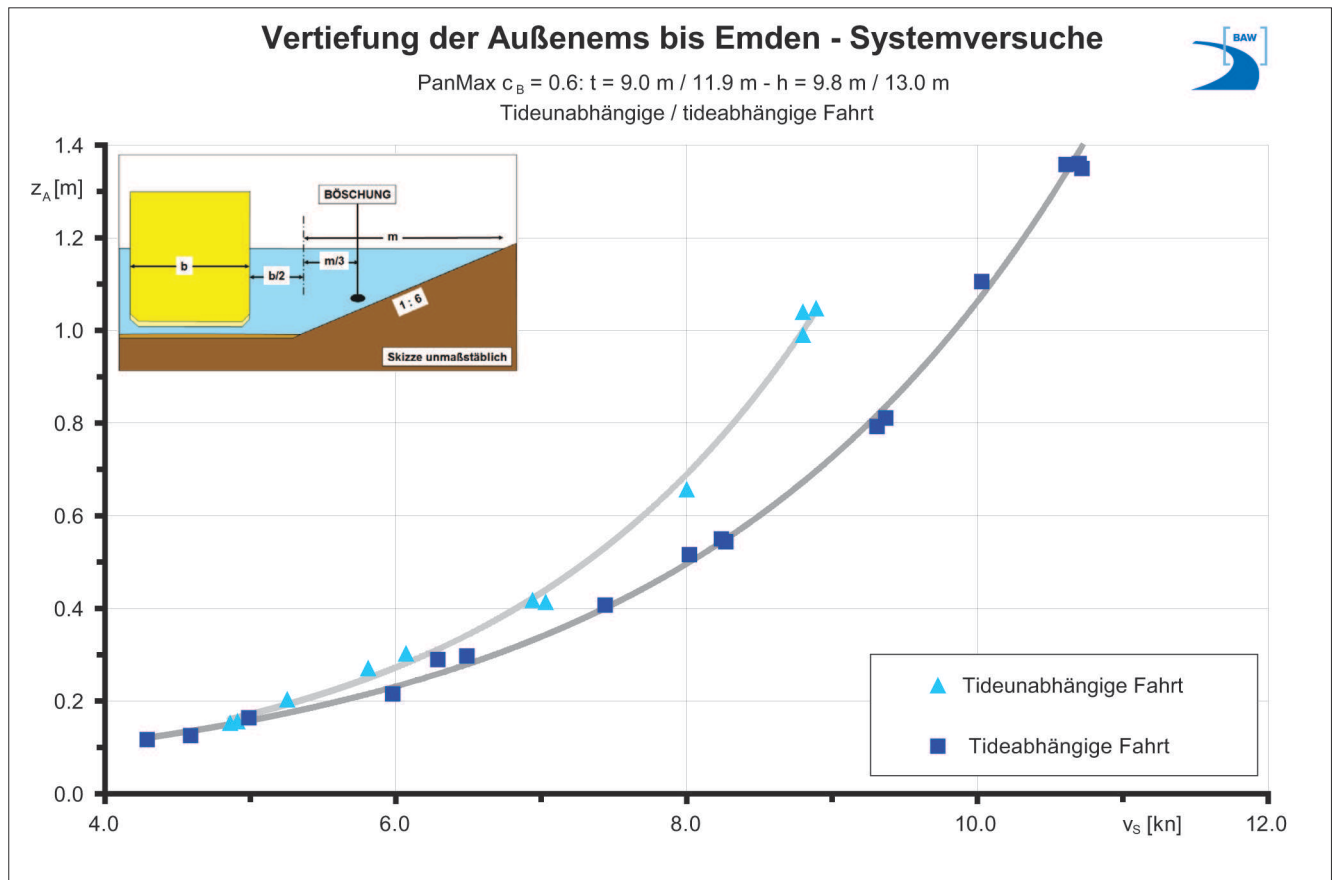


Bild 10: Systemversuche zum schiffserzeugten Absenk bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt für den Ausbau der Außenems (BAW, 2012)

Figure 10: Systematic trials for ship-induced drawdown for tide-dependent and tide-independent cruise for the adaptation of the Outer Ems (BAW, 2012)

4.3 Schiffsdynamik bei Revierfahrt

Ship dynamics in shallow and confined waters

Erste Untersuchungen zum fahrdynamischen Verhalten von Schiffen bei Revierfahrt (Squat und Trimm) wurden bei der BAW in den hydraulischen Modellen zur Fahrinnenanpassung der Elbe sowie zum Nord-Ostsee-Kanal vorgenommen, sowie deren Ergebnisse mit vergleichenden Betrachtungen zu diesen Revieren veröffentlicht (Uliczka, 2000). Das damals verwendete geometrischen Messverfahren nach Eryuzlu et al. (1994) wurde ab den Systemversuchen zum dynamischen Fahrverhalten von sehr großen Containerschiffen (Flügge und Uliczka, 2001) durch bis heute eingesetzte kontinuierlich aufzeichnende schiffsgestützte Laserzielplatten ersetzt.

Das FuE-Versuchsprogramm zur Schiffsdynamik umfasste den Einfluss der Schiffslänge sowie von Unter-

wasserdünen in seitlich unbegrenztem Flachwasser und die Wirkung von seitlich eingeschränkten Fahrinnen verschiedener Querschnittsverhältnisse (Revierfahrt) auf Squat und Trimm.

Ein ausgewähltes Ergebnis von umfangreichen Systemversuchen für verschiedenste Querschnittsverhältnisse bei mittiger und außermittiger Fahrt ist als Grafik in Bild 11 aufgetragen. Dargestellt sind geschwindigkeitsabhängige Squatkurven für Bug und Heck und daraus abzulesende Trimmänderungen für verschiedene schematisch dargestellte Versuchsserien (Uliczka et al., 2004).

Die Grafik verdeutlicht zum einen die geschwindigkeitsabhängige achterliche starke Vertrimmung bei engen Querschnitten, zum anderen z. B. bei $v_s \approx 13 \text{ kn}$ eine Zunahme des Heck-Squats um etwa einen halben Meter im Vergleich zum seitlich unbegrenztem Flachwasser (Bild 11; rote und hellblaue Linien).

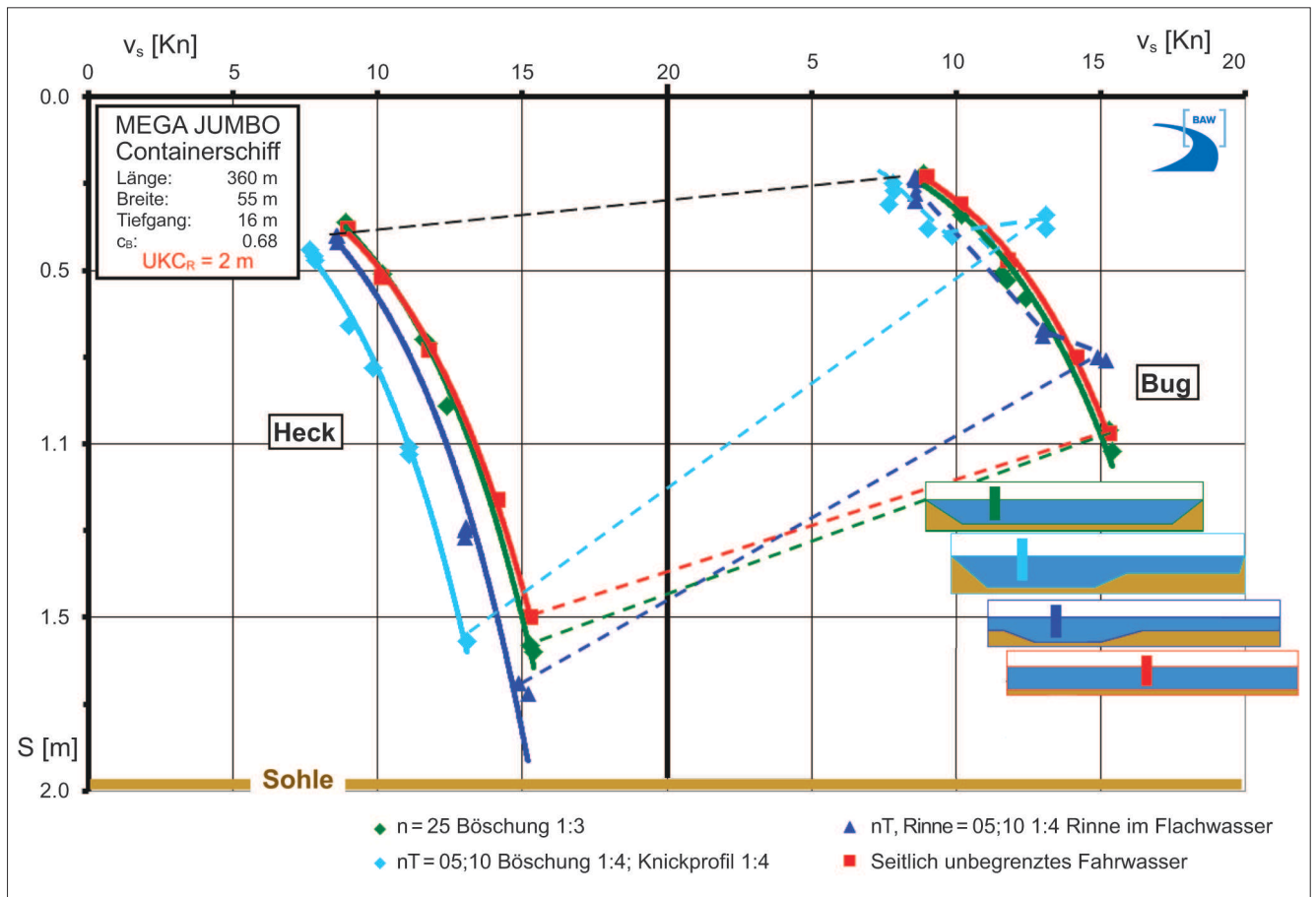


Bild 11: Einfluss von seitlichen begrenzten Flachwasserbereichen auf Squat und Trimm eines großen Containerschiffs im Vergleich zu seitlich unbegrenztem Flachwasser (Uliczka et al., 2004)

Figure 11: Effect of laterally confined shallow water areas on squat and trim of a large container vessel in comparison to laterally unrestricted shallow water (Uliczka et al., 2004)

4.4 Kräfte auf das Schiff bei Revierfahrt

Forces acting on the ship in shallow and confined waters

Mit der Beauftragung der BAW zur Optimierung der Schiffsführungssimulation für die Belange der WSV aufgrund der Ergebnisse des FuE-Projekts zu den Möglichkeiten und Grenzen der Schiffsführungssimulation für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse von Seeschiffahrtsstraßen (u. a. von Morgenstern, 2007b) lag der Schwerpunkt der Untersuchungen im hydraulischen Modell ab etwa 2009 auf der Erfassung der Kräfte auf große Fahrzeuge bei Revierfahrt.

Als Datenbasis für die modulare Implementierung in die Schiffsführungssimulation wurden die Querkräfte und Giermomente bei verschiedensten Randbedingungen im hydraulischen Modell ermittelt. Variiert wurden im Schiffswellenbecken u. a. Schiffsgröße, Kielfreiheit,

Passierabstand, Böschungsneigung (u. a. Uliczka und Kondziella, 2009).

Einen Eindruck der Messkonfiguration zur Erfassung von Kräften und Giermomenten bei Revierfahrt vermittelt das Foto der Fahrt eines selbstfahrenden Containerschiff-Modells nahe einer flach geneigten Uferböschung (Bild 12).

Derzeit laufen im Auftrag der WSV im Schiffswellenbecken der BAW-DH Untersuchungen zur Ermittlung der dynamischen Kräfte und Giermomente bei der Begegnung von AgF-Containerschiffen. Diese dienen als Datenbasis für die Optimierung der Schiffsführungssimulation bei Revierfahrt. Dabei werden EFD-Versuche mit Modellen der großer Containerschiffe (Breite $46\text{ m} < b < 59\text{ m}$) mit u. a. verschiedenen Geschwindigkeiten, Tiefgängen und Passierabständen vorgenommen.



Bild 12: Modellkonfiguration bei der Erfassung von Querkraften und Giermomenten am Schiff u. a. bei der Passage verschiedener Uferformen

Figure 12: Model configuration for the recording of transverse forces and yaw moment at the ship e.g. for passing different types of bank



Bild 13: Freifahrten im Schiffswellenbecken zur Erfassung der dreidimensionalen Schiffsdynamik bei Standard-Z-Manövern

Figure 13: Free manoeuvring in the ship wave basin for detecting the three-dimensional ship dynamics with standard zig zag manoeuvres

4.5 Manövrieren im Flachwasser

Manoeuvring in shallow and confined waters

Erste Vorversuche zu Freifahrten im Schiffswellenbecken zur Erfassung der Schiffsdynamik bei Standard-Z-Manövern wurden im Rahmen einer Diplomarbeit bei der BAW durchgeführt und für die Schiffsführungssimulation aufbereitet (Sponholz, 2011).

Die Weiterentwicklung der Messtechnik hinsichtlich der dreidimensionalen Erfassung der Schiffsdynamik bei Freifahrten im hydraulischen Modell (Bild 13) ermöglichte die Analyse der erfassten Bewegungen für die Bestimmung ausgewählter Parameter der Schiffsführungssimulation.

Systematische standardisierte Freifahrtversuche im hydraulischen Modell u. a. mit verschiedenen Schiffsgößen und Typen sowie Kieflfreiheiten sind zur Abschätzung der Flachwasserparameter für die Optimierung der Schiffsführungssimulation bei Revierfahrt vorgesehen.

5 Untersuchungen im numerischen Modell

Numerical model investigations

5.1 Einleitung

Introduction

Die Wellenbildung und die Schiffsdynamik sind Strömungsphänomene und durch Lösung der Impuls-, Energie- und Massengleichungen für Wasser oder Luft berechenbar. Hierbei ist günstig, dass beide Medien weitgehend Newtonsche Rheologie aufweisen. Damit sind die Gleichungen, die Stokes 1878 vorschlug, anwendbar. Bei den Geschwindigkeiten die für Schiffe in den Ästuaren interessant sind, ist weiterhin für die Berechnung der Strömungszustände begünstigend, dass sich beide Fluide annähernd inkompressibel verhalten. Dadurch lassen sich die Impulsgleichungen getrennt (entkoppelt) von den anderen beiden Gleichungen lösen. Dennoch bleibt die Schwierigkeit der Lösung der sogenannten Navier-Stokes-Gleichungen, dass sie in den drei Raumrichtungen gekoppelt sind und im Allgemeinen nicht geschlossen lösbar sind. Eine näherungsweise, iterative Lösung ist möglich, erfordert aber bei den Strömungen, die hier betrachtet werden müssen, einen so hohen numerischen Aufwand, dass die derzeit schnellsten Rechner mehrere Jahrhunderte für die Lösung benötigen.

Ingenieurmäßige Ansätze sind daher die einzige Möglichkeit, Strömungsvorgänge zu berechnen. Reynolds hat schon früh festgestellt, dass bei Körpern, die sich durch ein ruhendes Medium (Fluid) bewegen, die Strömungsphänomene auf einen engen Bereich nahe der Oberfläche des Körpers beschränkt bleiben. Diese Beobachtung war der Auslöser für die Grenzschicht-Forschung und zugleich Wegbereiter für einen wesentlich einfacheren Ansatz zur Berechnung der Strömungsvorgänge. Es werden lediglich die Euler-Gleichungen für die Bewegung des Fluids gelöst, das bedeutet jegliche Zähigkeit vernachlässigt. Streng genommen ist dieser Ansatz nur für Suprafluide wie flüssiges Helium physikalisch gültig, in guter Näherung aber auch außerhalb der Grenzschicht um den Körper. Die Euler-Gleichungen haben eine mathematisch wohlbekannt Form, sie sind Vertreter der Poisson-Gleichungen und ähneln damit den Gleichungen für das Gravitationsfeld oder elektrostatische und magnetische Felder. Da sich mit den Feldlinien elektrostatischer Felder Strömungen um rotationssymmetrische Körper darstellen lassen, spricht man auch von Potenzialströmungen. Der große Vorteil liegt in der guten Lösbarkeit dieser Gleichungen. Moderne Computer benötigen selbst für Strömungsgebiete großer räumlicher Ausdehnung und komplexer Geometrien nur Sekundenbruchteile zur Lösung. Dieser Ansatz ist folglich vor allem bei Strömungsuntersuchungen, bei denen unter einer großen Variantenzahl ausgewählt werden soll, wie es beispielsweise bei Formoptimierungen vorkommt, das Mittel der Wahl. Für die Vorhersage des Squat in Wasserstraßen erschien dieser Ansatz auch sehr attraktiv, da er die Möglichkeit bietet, in relativ kurzer Zeit sehr viele unterschiedliche Schiffsförmungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Wasserstraßenquerschnitten berechnen zu können. Dieser Ansatz wurde in der BAW über Jahre verfolgt. Für die WSV relevanten Fragestellungen zeigte sich jedoch, insbesondere für die Bereiche mit sehr geringer Kielfreiheit oder großer Verblockung der Wasserstraßenquerschnittsfläche durch den Rumpf des Schiffes in denen Squat dominant wird, dass die Zähigkeitseffekte an Einfluss zunehmen und ein erweiterter Berechnungsansatz zu wählen ist (Böttner et al., 2011).

Anfangs nur zum Vergleich und zur Unterstützung der Ermittlung von potenzialtheoretischen Ansätzen vorgesehen, zeigte sich schnell die Leistungsfähigkeit von Lösern der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANSE, „Reynolds averaged Navier-Stokes

equations“). Die Konsequenz aus dieser Untersuchung war dann, dass an der BAW für schiffsdynamische Untersuchungen im Kontext der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße ein Verfahren aus der Familie der RANSE-Löser eingeführt wurde. Zum Einsatz kommt ein kommerzielles Produkt aus der numerischen Strömungsmechanik (CFD), das sehr verbreitet ist in den Bereichen Schiffbau, Luft- und Raumfahrttechnik sowie weiterer Technologiesektoren.

Die Methode der CFD-Berechnung in der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße wurde im Rahmen eines FuE-Projektes in der BAW-DH eingeführt. Das Kernziel war die Berechnung der schiffsdynamischen Parameter Squat und Trimm⁵ von großen Seeschiffen im seitlich begrenzten Flachwasser. Neben der Schiffsdynamik wird derzeit auch die dynamische Belastung durch Schiffswellen untersucht. Beide Untersuchungsbereiche werden im Folgenden kurz vorgestellt.

5.2 Validierung der schiffsdynamischen Parameter Squat und Trimm

Validating the ship dynamic parameters squat and trim

Als neu eingeführte Methode wurde die Belastbarkeit der CFD Ergebnisse durch einen Vergleich mit Messungen im Schiffswellenbecken im Sinne einer Validierung geprüft. Damit können mögliche Defizite aufgedeckt und der Aufwand realistisch eingeschätzt werden.

Die zur Validierung verwendeten Messungen stammen aus einer Versuchsserie, die im Jahr 2001 im Schiffswellenbecken der BAW-DH durchgeführt wurden (Uliczka et al., 2004). Der Versuchsaufbau im CFD-Modell entspricht im Wesentlichen dem Aufbau im Schiffswellenbecken (s. Bild 14). Ein wesentlicher Unterschied betrifft das Bezugssystem. Da im CFD-Modell mit der verwendeten Morphertechnik nur geringe Bewegungen wiedergegeben werden können, wurde das Schiff im CFD-Modell teilgefesselt und vom Wasser angeströmt. Im hydraulischen Experiment fährt das Schiff durch ruhendes Wasser und wird selbstpropulsiv angetrieben.

Die Versuchsbedingungen mit der seitlichen Begrenzung und vor allem der geringen Kielfreiheit („Under

⁵ Trimm bezeichnet die Rotation um die Querachse (Stampfen)

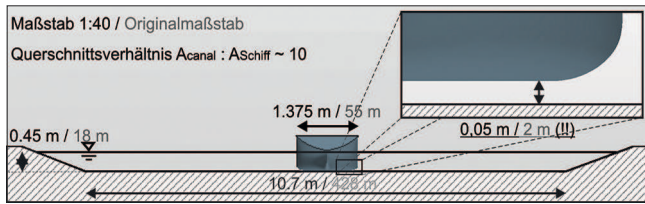


Bild 14: Schematischer Querschnitt durch den Versuchsaufbau; die Zahlen in rot entsprechen sowohl dem hydraulischen als auch dem CFD-Simulationsmodell im Maßstab 1 : 40, die schwarzen Zahlen entsprechen den realen Verhältnissen

Figure 14: Schematic cross section of the experimental setup; the numbers in red correspond to the hydraulic as well as the CFD model at a scale of 1 : 40, the black numbers correspond to conditions in nature

Keel Clearance“, UKC, s. Bild 14) stellen den numerischen Versuchsaufbau vor erhebliche Herausforderungen.

Es musste aus numerischen Gründen verhindert werden, dass das Schiff vor allem während der Einschwingphase die Modellgrenze an der Sohle berührt. Dem Problem begegnet wurde mit einer Randwertsteuerung, die die Simulation über Zwischenschritte an die gewünschte Anströmgeschwindigkeit führt. Mit diesem Vorgehen wurde die Diskrepanz zwischen den Anfangsbedingungen in Bezug auf die Lage des Schiffes und den Randbedingungen verringert, sodass die Simulationen zwar mit höherem Aufwand aber ohne technische Fehler durchgeführt werden konnte.

Ein Teilergebn für das Querschnittsverhältnis von $n = 10$ mit einem Postpanmax-Containerschiff (Länge 360 m, Breite 55 m, Tiefgang 16 m) zeigt Bild 15. Das Querschnittsverhältnis ist gleich dem Verhältnis zwischen der benetzten Querschnittsfläche des Kanals und der eingetauchten Hauptspantfläche des Schiffes. Die Ergebnisse für das Verhältnis $n = 10$ entsprechen dem kleinsten Wert der Versuchsserie und spiegeln damit die sehr engen Bedingungen für Seeschiffahrtsstraßen wider.

Der im Modellmaßstab 1 : 40 berechnete Hecksquat entspricht in etwa dem gemessenen Hecksquat mit wenigen Millimetern Abweichung (vgl. Bild 15). Die Abweichung des Bugsquats ist größer, jedoch nicht so kritisch, da der Gesamtsquat der größten Absenkung des Schiffes und damit dem Hecksquat entspricht. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass das CFD-Modell keinen Propeller hat. Dieser

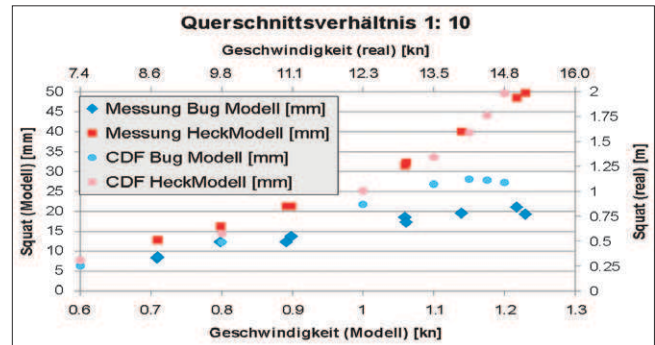


Bild 15: Validierungsergebnisse für ein Postpanmax-Containerschiff im Querschnittsverhältnis 1 : 10

Figure 15: Validation results for a Postpanmax container vessel with an aspect ratio of 1 : 10

würde durch die zusätzliche Beschleunigung des Wassers zu einer weiteren Absenkung des Wasserspiegels und damit des Squats führen.

Der Berechnungsaufwand für diese Simulation ist erheblich und beträgt etwa sieben Tage auf dem derzeitigen Hochleistungsrechner der BAW-DH mit 32 CPU-Kernen für ein Berechnungsnetz aus ca. 2 Mio. Zellen.

5.3 Berechnung eines Wellenfeldes in seitlich begrenzten Flachwasser

Simulation of a wave field for laterally confined shallow water conditions

Die dynamische Berechnung des schiffserzeugten Wellenfeldes ist im Hinblick auf die Uferbelastung durch Schiffswellen ein weiteres Untersuchungsfeld, das perspektivisch mit numerischen Methoden untersucht werden soll. Hier ist zunächst die Plausibilität der Simulationsergebnisse zu prüfen. Im Gegensatz zur Schiffsdynamik liegt der Fokus damit nicht auf der Schiffsumströmung sondern auf der Entstehung und Ausbreitung der Wellen bzw. auch der Interaktion der Welle mit einer abgeflachten Böschung. Entsprechend dieser veränderten Aufgabenstellung müssen die begrenzten Ressourcen im Simulationsmodell umverteilt werden. Das Schiff wurde in allen sechs Freiheitsgraden gefesselt, sodass kein Berechnungsaufwand für die dynamische Schwimmelage mehr aufgebracht werden musste. Im Gegenzug wurde das Berechnungsgitter vor allem an der Böschung stark verfeinert, um die dortigen Strömungsvorgänge ausreichend aufzulösen. Die Berechnung erfolgte bis zur Konvergenz von Längskraft und Wasserständen an mehreren Beobachtungspunkten.

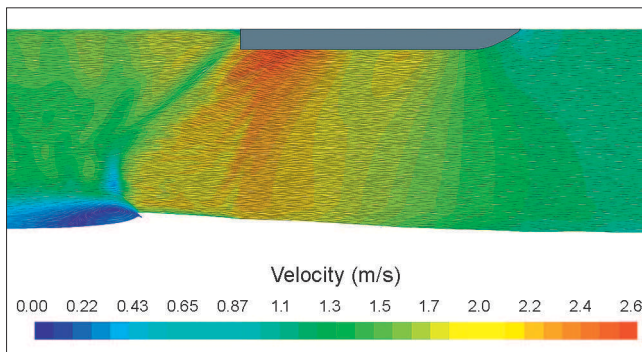


Bild 16: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung an der Wasseroberfläche (Aufsicht) bei einem Querschnittsverhältnis $n = 10$ und einer Anströmung von 1,5 m/s im Modellmaßstab 1 : 40

Figure 16: *Calculated velocity distribution on the surface (top view) with an aspect ratio $n = 10$ and a flow velocity of 1.5 m/s in the 1 : 40 scale model*

Eine Simulation mit ca. 10 Mio. Zellen auf 128 CPU-Kernen benötigte ca. acht Stunden. Ein Ergebnis der Strömungsgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche zeigt Bild 16. Die Strömungsfäden an der Oberfläche sind mit der Linienintegralfaltungsmethode (engl. LIC, line integral convolution) sichtbar gemacht. Gut erkennbar ist eine Welle am Heck des Schiffs, die sich bis zur Böschung im Nachstrom hinzieht.

Die Strömung vollzieht im Böschungsbereich eine horizontale Rotationsbewegung, die auch in Modellversuchen bei entsprechend hohen Geschwindigkeiten des Schiffs beobachtet werden kann. Die Simulationsergebnisse stimmen insgesamt mit Beobachtungen gut überein und können als plausibel eingestuft werden, im nächsten Schritt ist ein detaillierter Vergleich mit Messungen als Modellvalidierung erforderlich.

5.4 Simulation der Schiff-Schiff-Interaktion *Simulation of ship-ship interaction*

Neben der Dynamik des einzelnen Schiffs können auch Schiff-Schiff-Interaktionen untersucht werden. Analytische Parameter sind hierbei insbesondere die wirkenden Kräfte und Momente von zwei sich begegnenden Schiffen, die mit EFD-Messungen im Schiffswellenbecken verglichen werden können. Die CFD-Methode wird derzeit parallel zu den hydraulischen Versuchen (EFD) eingesetzt, um diese im Hinblick auf weitere Varianten zu ergänzen und damit den Zeitbedarf der Untersuchungen im Schiffswellenbecken zu verkürzen. Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zusammen mit den

Ergebnissen aus den Schiffswellenbecken (EFD) bilden eine Datenbasis für den Schiffsführungssimulator.

Die numerischen Herausforderungen bei Untersuchungen zu dieser Fragestellung liegen zum einen wieder in der geringen Kielfreiheit und zum anderen in der effizienten Abbildung der Fahrt beider Schiffe im ruhenden Wasser. Zur Abbildung der Bewegung kommt eine neue Softwaretechnik mit dem Namen Overset zum Einsatz. Diese erlaubt es auch große Bewegungen abzubilden. Damit kann auf einen Wechsel des Bezugssystems verzichtet werden. Sowohl die geringe Kielfreiheit als auch die neue Softwaretechnik erfordern sehr viele Berechnungsressourcen, da die Berechnungsnetze zwischen 20 und 30 Mio. Zellen betragen und der Zeitschritt durch die Softwaretechnik und die verwendeten Berechnungsnetze bei diesen Simulationen auf eine Zeitschrittweite von etwa 20 ms begrenzt ist.

5.5 Simulation des Propellerstrahls *Simulation of the propeller*

Der Fokus zukünftiger Arbeiten liegt unter anderem auf der Abbildung des Propellerstrahls, der bisher nicht berücksichtigt werden konnte. Die Integration eines Propellers kann in Form unterschiedlicher Propellermodelle erfolgen und soll in CFD-Simulationen getestet und nach Möglichkeit validiert werden. Durch den Einsatz eines Propellers kann eine realitätsnähere Schiffsumströmung berechnet werden. In Kombination mit der Oversettechnik ist es damit dann erstmals möglich sehr ähnliche Versuchsbedingungen wie im Schiffswellenbecken herzustellen: ein selbstangetriebenes Schiff, das durch ruhendes Wasser fährt.

6 Untersuchungen im Schiffsführungssimulator *Ship handling simulator investigations*

6.1 Einleitung *Introduction*

Die sichere Führung großer Fahrzeuge, zu Land, in der Luft und zu Wasser, erfordert Umsicht, Können und Erfahrung. Das grundlegende Wissen wird dabei in spezialisierten Schulen erworben. Die Erfahrung

kann nur „erfahren“ werden. Da große Fahrzeuge, wie Passagierflugzeuge und Handelsschiffe, im Betrieb zu aufwändig und kostspielig sind für einen Fahrschulbetrieb, besteht der Bedarf an Übungsmöglichkeiten. Für den Schiffsführer gibt es zwei Möglichkeiten, die beide angeboten werden. Zum einen kann auf einer Art Verkehrsübungsplatz im Maßstab 1 : 10 oder kleiner in extra hierfür eingerichteten Wasserstraßen und Becken gefahren werden. Prominente Beispiele hierfür sind in Europa Port Revel in Frankreich und Ilawa in Polen, es gibt weitere Einrichtungen auf der ganzen Welt.

Als Nachteil dieser Methode gilt der Einfluss von Maßstabeffekten. Bedingt durch den Modellmaßstab laufen alle Vorgänge beschleunigt um den Faktor Wurzel aus dem Modellmaßstab ab, also bei den sehr großen Anlagen mit Maßstab 1 : 20 etwas mehr als dreimal kürzer als in Realität, bei kleineren Anlagen entsprechend schneller. Außerdem ist die Instrumentierung der Modellschiffe der echten Schiffe bestenfalls rudimentär nachgebildet. In diesen beiden Punkten ist die zweite Möglichkeit, ein computergestützter Schiffsführungssimulator mit Full-Mission-Bridge-Ausstattung, deutlich überlegen.

Mittlerweile sind auf den Schiffsbrücken in Schiffsführungssimulatoren Echt-Konsolen mit vollständiger „Integrated-Bridge“ Instrumentierung aus Echtgeräten Standard. Da der Simulator im Naturmaßstab modelliert, gibt es keine Maßstabeffekte. Schwachpunkt dieses Ansatzes ist die Naturtreue der numerischen Berechnungen. Der Simulator kann nur so realistisch sein, wie das Modell zur Manöverprognose und Berechnung der Fahrdynamik die natürlichen Verhältnisse berechnen und abbilden kann.

Der erste Schiffsführungssimulator entstand in Japan, 1970 wurde er an der Hiroshima University in Betrieb genommen (Hasegawa, 2010). Der Schiffsführer schaute auf eine von einem Projektor von hinten angeleuchtete Leinwand und hatte ein Steuerrad als Eingriffsmöglichkeit. 1974 gab es bereits eine gekrümmte Leinwand mit 180° Sicht und einem stilisierten Brückenlayout. Der prinzipielle Aufbau des Schiffsführungssimulators hat sich seit dem kaum verändert, die eingesetzte Technik ist aber ständig leistungsfähiger geworden, sodass der Grad der Realitätstreue kontinuierlich gesteigert werden konnte. Schiffsführungssimulatoren basieren meist auf Ansätzen zur Manöverprognose, die ursprünglich

entweder für Autopilot-Anlagen oder zur Vorhersage der Manövrierfähigkeit eines Entwurfes entwickelt wurden. Daher wurden Simulatoren recht früh genutzt, um erfahrenes nautisches Personal an kompliziert oder ungewöhnlich zu führende Schiffe heranzuführen. Große Tankschiffe sind bekannte Vertreter solcher Schiffe und waren Gegenstand erster Spezialtrainings an Schiffsführungssimulatoren.

Bei der Planung und Vorbereitung großer wasserbaulicher Vorhaben ist es ein naheliegender Wunsch, die Wasserstraße oder die Hafenzufahrt, Schleuseneinfahrt, vor der Realisierung bereits testen und befahren zu können. Dieses bietet die Schiffsführungssimulation durch ihren „Virtual Reality“ Ansatz. Die Bauwerke können bereits in der Planungsphase vom Wasser aus betrachtet und die Wasserstraßen virtuell befahren werden. Daher ist seit Mitte der 1990er-Jahre die Überprüfung großer Baumaßnahmen in der Planungsphase mit einer Schiffsführungssimulation weltweit üblich. 1992 erschien ein Handbuch zur Simulation für die Überprüfung wasserbaulicher Maßnahmen (Webster, 1992). Viele Empfehlungen darin haben noch Gültigkeit, andere wurden durch die rasante technische Entwicklung überholt.

6.2 Schiffsführungssimulation an der BAW in Hamburg

Ship handling simulation at BAW in Hamburg

In Hamburg werden eine Full-Mission-Bridge mit Echtgeräten (Bild 17) und eine zweite, nur minimal ausgestattete Brücke für Forschungs- und Entwicklungszwecke betrieben. Wesentlicher Einsatzzweck ist die Überprüfung bestehender Berechnungsmodelle bezüglich deren Genauigkeit bei der Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse. Parallel dazu entwickelte Ergänzungen und Anpassungen der fahrdynamischen Modelle für die Fahrt im flachen und begrenzten Fahrwasser werden auf diesem Fahrstand installiert und in der Umgebung einer vollständig ausgestatteten Brücke in einer Schiffsführungssimulation ausführlich getestet. Anschließend werden diese Modelle der WSV zur Verfügung gestellt, um an großen Simulator-Anlagen von Auftragnehmern bei der Durchführung von Schiffsführungssimulationen zur Überprüfung wasserbaulicher Maßnahmen zum Einsatz zu kommen.

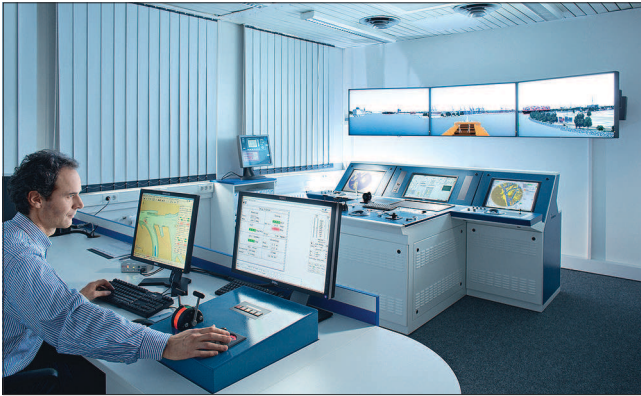


Bild 17: Forschungs- und Entwicklungsumgebung Schiffsführungssimulator bei der BAW, Dienststelle Hamburg

Figure 17: *Research and development environment: the ship handling simulator at BAW, Hamburg Office*

Generell steht die BAW der WSV als Berater zu allen fachlichen Fragen rund um die Schiffsführungssimulation an der Küste zur Verfügung. Neben der Entwicklung angepasster fahrdynamischer Modelle umfasst die Beratung auch die Unterstützung bei der Ausschreibung und Durchführung von Vergaben von nautischen Untersuchungen, hydrodynamischen Gutachten, Beratung bei der Anerkennung von Simulator-Betreibern für die Belange der WSV und die fachliche Bewertung von Manövermodellen.

Der Schiffsführungssimulator in Hamburg wird neben der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit auch für sogenannte „Fast-Time-Simulationen“ eingesetzt. Diese laufen ohne Berücksichtigung des Faktors Mensch ab. Es geht hierbei um die Einschränkung der später zu untersuchenden Fälle, für die eine vollständige Schiffsführungssimulation in Echtzeit mit erfahrenen Nautikern notwendig ist. Dieser Ansatz erlaubt die Durchführung von Fahrten in wesentlich kürzerer Zeit und damit die Untersuchung einer relativ großen Anzahl unterschiedlicher Randbedingungen. Dadurch wird eine gezielte Auswahl beispielsweise an Windstärken und -richtungen möglich, die in einer vollständigen Simulation untersucht werden müssen.

Diese Vorab-Auswahl spart Zeit und Kosten, indem sie die Gesamtzahl an Fahrten in einer vollständigen Full-Mission-Simulation reduziert.

6.3 Forschung für den Schiffsführungssimulator im Küstenbereich

Research for ship handling simulation in coastal areas

Aus den eingangs genannten Aufgaben der BAW rund um die Schiffsführungssimulation ergeben sich mehrere Forschungsfelder und fachliche Fragestellungen, die bearbeitet werden müssen. Das Themenfeld umfasst alle Aspekte der Schiffsführungssimulation, von den schiffbaulichen Versuchen, über die Planung einer Schiffsführungssimulation mit wasserbaulicher Zielstellung bis hin zu der Auswertung und Interpretation von einzelnen Fahrten am Simulator.

Da Schiffsführungssimulatoren primär für die Fahrt im tiefen Wasser entwickelt wurden, ist der für die WSV relevante Anwendungsfall der Revierfahrt im flachen und seitlich begrenzten Wasser generell nicht zufriedenstellend abgebildet. Die Arbeit der BAW zielt daher darauf ab, diese Lücke durch angepasste Modelle und Verfahren zu schließen.

Eine ganz grundlegende Frage betrifft die Manövriermodellierung. Sie ist die Basis eines Schiffsführungssimulators, durch sie werden die Reaktionen des virtuellen Schiffs zu jedem Zeitpunkt in der Simulation festgelegt. Ist für Ausbildungs- und Trainingszwecke eine Annäherung an das reale Verhalten eines bestimmten einzelnen Schiffs ausreichend, so muss dies nicht für eine Simulation zur Bemessung oder Befahrbarkeitsanalyse gelten. In dem ersten Fall reicht es, wenn die im Simulator erkennbare Fahrdynamik fahrzeugtypisch und realistisch erscheint. Im anderen Fall ist eine sehr hohe Naturähnlichkeit gefordert, da sie zur Bemessung eines Streckenabschnitts oder zur Entscheidung über die Befahrbarkeit eines ganz konkreten Schiffes eine gültige Aussage erlauben muss. Bei dem Schiffsführungssimulator der BAW in Hamburg werden bei allen schiff- und wasserbaulichen Modellversuchen zugleich hydrodynamische Kräfte und dynamische Daten wie Schwimmlagen erfasst und für die Entwicklungen am Schiffsführungssimulator ausgewertet. Experimentelle Messwerte sind die Messlatte, die gelegt wird, wenn Manövriermodelle oder numerische Strömungssimulationen zur Bewertung kommen. Sie werden aber auch zur Einschätzung der technischen Betreiberkompetenz bei den Prüfprozeduren in Rahmen der Bewerberauswahl bei Ausschreibungen von Schiffsführungssimulationen durch die WSV eingesetzt.

Die meisten Messfahrten im hydraulischen Modell der BAW erfolgen längs zu einer Böschung, da sie Bestandteil von Untersuchungen zur Belastung einer Wasserstraße im Rahmen von Planfeststellungsverfahren sind. Dadurch stehen für die Schiffsführungssimulation der Revierfahrt Werte zu Bank-Kräften und Bank-Momenten über eine große Bandbreite von Abständen zum Böschungsfuß, Geschwindigkeiten, Schiffstypen, Tiefgängen, Wasserständen und nicht zuletzt Böschungsneigungen zur Verfügung. Diese werden systematisch ausgewertet und bilden anschließend die Grundlage der Entwicklung eines abgesicherten Modells der Schiff-Bank-Interaktion in der Schiffsführungssimulation. In gleicher Weise entstand eine umfangreiche Datenbank an Werten zum Squat, die damit ebenfalls Quelle abgesicherter Werte zur Kalibrierung der Modelle im Simulator ist.

Weitere grundlegende Untersuchungen betreffen die Sensitivität des Manörierverhaltens eines Containerschiffs auf Änderungen der Schwimmlagen. Dazu wurden die vollständigen Sätze an Abkowitz-Koeffizienten (Abkowitz, 1964) für die Manöverprognose bei vorlichem und achterlichem Trimm und unterschiedlichen Tiefgängen berechnet und verglichen. Davor wurden ähnliche grundlegende Untersuchungen für Aspekte der Kielfreiheit durchgeführt. Beispielsweise wurden der Einfluss der Kielfreiheit auf die Ruderwirksamkeit, die Bedeutung der Schräganströmung bei Drift-Fahrt für die Ruderwirksamkeit und der Längswiderstand bei unterschiedlichen Graden der Verblockung eines Wasserstraßenquerschnitts durch die Hauptspantfläche des Schiffes untersucht.

Aus diesen und weiteren Untersuchungen stehen nun die Daten bereit, die angepasst an die Bedürfnisse der WSV Ergänzungen im Manöriervermodell des Simulators einbringen.

Zukünftig ist vorgesehen, Manöver direkt mit den physikalischen Modellen durchzuführen und zu vermesen. Das dazu notwendige Vorgehen aus einer Serie von freimanörierenden Fahrten, deren anschließende Auswertung und die Einstellung des fahrdynamischen Modells in der Schiffsführungssimulation mit möglichst genauer Übereinstimmung der Manöver wurde bereits exemplarisch durchgeführt (Sponholz, 2011). Der Vergleich von Messdaten mit dem fahrdynamischen Verhalten des Simulators ist in Bild 18 dargestellt.

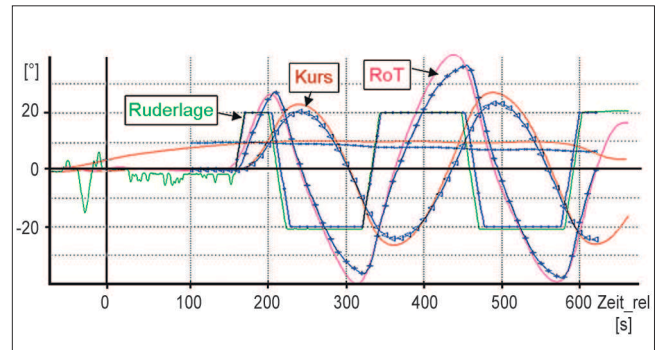


Bild 18: Messdaten eines Massengutschiffmodells (Maßstab 1 : 40) für ein Z-20-10-Manöver im Versuch (durchgezogen) und Abbildung im Schiffsführungssimulator (Symbole).

Figure 18: Measurement data of a bulk carrier model (scale 1 : 40) for a zig zag-20-10 manoeuvre based on experiments (solid line) and as resolved in the ship handling simulator (symbols).

Aktuell begonnen wurde das FuE-Projekt *Safe-Zone*, in dem der Binnen- und der Seeschiffssimulator der BAW und ein externer Betreiber eines Simulators, MTC Hamburg, gemeinsam forschen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer automatisierten Analyse einer nautischen Situation in der Schiffsführungssimulation. Hierfür wird zunächst eine Datenbankanbindung an den Simulator erstellt. Die Auswertung der hier gespeicherten Daten wird dann eine objektive Ergänzung und zusätzliche Kriterien zu der weiterhin unverzichtbaren Einschätzung durch erfahrene Nautiker (das sogenannte „Expert-Rating“) liefern. Das Ergebnis der Auswertung soll gemeinsam mit den durchgeführten Fahrten in derselben Umgebung (elektronische Seekarte) dargestellt werden. Dadurch können die automatisierten Auswertungen in die abschließende Bewertung der einzelnen Fahrten durch alle beteiligten Nautiker, das sogenannte Debriefing, einbezogen werden. Hiermit soll bei einer Bemessung oder Befahrbarkeitsanalyse die Möglichkeit geschaffen werden, zusätzlich zum Expert-Rating weitere Kriterien zum Nachweis der Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs anzulegen.

7 Zusammenfassung und Ausblick *Conclusion and Outlook*

Die Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße ist sowohl ein wesentlicher Faktor für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs (Fokus Schiff), als auch für die wirtschaftliche Unterhaltung der Seehafenzufahrten (Fokus Wasserstraße).

Die Fahrt im flachen und seitlich begrenzten Fahrwasser beeinflusst die Schiffsdynamik, insbesondere den für die maximal zulässigen Tiefgänge relevanten Squat. Diese geschwindigkeitsabhängige Absenkung des Schiffs mit dem selbst erzeugten Wellensystem wurde in Messungen in der Natur und im hydraulischen Modell für unterschiedliche Schiffstypen bestimmt. Damit konnten wesentliche Beiträge für die Bestimmung der maximal zulässigen Tiefgänge in den Seehafenzufahrten geleistet werden.

Die nur sehr aufwändig durchzuführenden Messungen werden heute durch Simulationen mit numerischen Modellen ergänzt. So können auf Basis gemessener Referenzdatensätze weitere Varianten auch numerisch untersucht werden. Diese Entwicklung wird sich in der Zukunft fortsetzen und es wird möglich sein weitere Untersuchungsfelder abzudecken. Derzeitiger Forschungsschwerpunkt der BAW ist dabei die Interaktion zwischen Schiffen sowie die Abbildung des Propellers.

Die Beeinflussung der Schiffsdynamik durch die Wasserstraße selbst ist insbesondere bei der Fahrrinnenbemessung zu berücksichtigen. Diese Aufgabe wird heute ebenfalls überwiegend auf Basis von Simulationen, in diesem Fall mit einem Schiffsführungssimulator, durchgeführt. Damit dieser belastbare Ergebnisse liefern kann, ist eine naturähnliche Abbildung der physikalischen Prozesse notwendig. Hier wurden in der Vergangenheit wesentliche Verbesserungen erzielt, indem die Erkenntnisse aus den hydraulischen Modellversuchen in geeignet parametrisierter Form für die Schiffsführungssimulation zur Verfügung gestellt wurden. Für die notwendige Fortsetzung dieser Arbeiten sind wiederum weiterführende Untersuchungen im hydraulischen bzw. im numerischen Modell erforderlich.

Neben der Sicht auf das Schiff ist die Wirkung der Schiffe als maßgebliche Belastungsgröße der Ufer wesentlicher Bestandteil der Fachaufgabe „Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße“. Insbesondere im Hinblick auf eine wirtschaftliche Unterhaltung der Wasserstraßen gewinnt diese mit steigenden Schiffgrößen weiter an Bedeutung hinzu. Die Untersuchung der Wirkung von Schiffswellen wurde in der Vergangenheit insbesondere im Zusammenhang mit den Ausbauten der Seehafenzufahrten untersucht und deren ausbaubedingte Änderungen bestimmt. Die Erfahrungen aus diesen Untersuchungen, zusammen mit den Ergebnis-

sen aus dem gezielten Monitoring einzelner Bühnenbauwerke, werden zukünftig die Entwicklung neuer, probabilistischer Bemessungsansätze erlauben.

Die hier übersichtsartig dargestellten Anwendungsfälle aus dem Bereich der Wechselwirkung Schiff-Wasserstraße im Küstenbereich zeigen die hohe Bedeutung dieser Fachaufgabe für die Schifffahrt und das Management der Wasserstraßen. Gleichzeitig wurde die heute eingesetzte methodische Vielfalt aus Messungen in der Natur und im hydraulischen Modell, sowie die Untersuchung mit numerischen Methoden und der Schiffsführungssimulation sowie deren Weiterentwicklungspotenzial aufgezeigt.

8 Literatur *References*

- Abkowitz, M. A. (1964): Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and Manoeuvrability. HyA Report HY-5.
- BAW (1992): Schiffswellenuntersuchungen Hafen Schullau. BAW-Nr. 84407/8.
- BAW (1994): Ausbau der Außenweser auf SKN –14 m, Seegangs- und Schiffswellenuntersuchungen in der Außenweser vor der Wurster Küste. BAW-Nr. 9253 3381.
- BAW (1996): Naturmessungen zur Ermittlung schiffserzeugter Belastung der Untertrave durch die MS „Finnhansa“ mit geotechnischer Beurteilung. BAW-Nr. 94 52 3419.
- BAW (1997): Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock – Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen von schiffserzeugten Belastungen. BAW-Nr. 93 52 3410b.
- BAW (1998): Erosionsverhalten von Böschungen am NOK – Untersuchungen im hydraulischen Modell zur Ermittlung schiffserzeugter Belastungen. BAW-Nr. 97 52 3449.
- BAW (2006): Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. BAW-Nr. A3955 03 10062 – H.1d.

- BAW (2011): Schiffserzeugter Sedimenttransport (SeST). Forschungskompodium Verkehrswasserbau der BAW, S: 258-261.
- BAW (2012): Vertiefung der Außenems bis Emden – Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. BAW-Nr. A39550210121.
- BAW (2015): Pilotprojekt zur Stabilität von optimierten Strombauwerken. BAW Geschäftsbericht 2014.
- Behm, J.; Jansch, H. (2015): Anforderung der Seeschiffahrt – Optimale Nutzung der Bundeswasserstraße Elbe. Vortrag BAW-Kolloquium.
- Böttner, C.-U.; Uliczka, K.; Heimann, J (2011): Numerical Prediction of Squat of large Container Carriers on Waterways. Proceedings MARINE CFD, March 2011, London, UK.
- Chen, X.-N.; Uliczka, K. (1999): On Ships in Natural Waterways. Proceedings International Conference on Coastal Ships and Inland Waterways. © The Royal Institution of Naval Architects (RINA).
- Eryuzlu, P.; Cao, Y. L.; D’Agnolo, F.(1994): Underkeel Requirements for Large Vessels in Shallow Waterways. 28th Int. Navigation Congress of PIANC, Section II-2.
- Flügge, G.; Uliczka, K. (2001): Dynamisches Fahrverhalten und Wechselwirkungen mit der Fahrrinnensohle von sehr großen Containerschiffen unter extremen Flachwasserbedingungen. HANSA, 138. Jhg., Nr. 12, S. 60-67.
- Hasegawa, K. (2010): Low Speed Manoeuvring and New Aspects of Manoeuvring in Port Area – Thirty Years Research Review. Invited Lecture, CAMS2010, Intern. Conference, September 2010, Rostock, Germany.
- if (2006): Naturmessungen zur schifferzeugten Belastung des Deichsiels Hollerwettern. Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Fittschen, Hamburg.
- IM+P (2002): Schiffswellenmessungen in der Aussenweser – Beweissicherung. Bericht Nr. 140, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner GbR, Oldenburg.
- IMS (2006): Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterweser – Gutachten zur Erfassung des Ist-Zustandes schiffserzeugter Belastungen der Unterweser. Bericht Nr. 9013-02a, IMS Ingenieurgesellschaft mbH.
- IMS (2010): Vertiefung der Außenems – Schiffserzeugte Wellen- und Strömungsbelastungen. Gutachten zur Erfassung des Ist-Zustandes. IMS Ingenieurgesellschaft mbH, Bericht Nr. 90141-02 / 30.04.2010, Hamburg.
- Jensen, J.; Kelln, V.; Niehüser, S.; Arns, A.; Uliczka, K.; Kondziella, B. (2015): Entwicklung empirisch-analytischer Ansätze als Proxy für schiffserzeugten Sedimenttransport an Seeschiffahrtsstraßen. Tagungsband HTG-Kongress 2015, S. 231-240.
- Kondziella, B.; Böder, V.; Prokoph, A.; Sauer, A. (2013): Forschung und Entwicklung zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST) im NOK und in der Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Tagungsband Veranstaltungen 5/2013.
- Krey, H. (1913): Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser. Sonderabdruck aus der Zeitschrift „Schiffbau“, XIV. Jhg., Verlag Carl Marfels AG, Berlin.
- Maushake, C.; Joswig, S. (2004): Messung von Squat, Trimm und Krängung sehr großer Containerschiffe im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen auf der Elbe. Hydrographische Nachrichten Nr. 072, Deutsche Hydrographische Gesellschaft.
- Nwogu, O. G. (1997): Numerical Model Study of Ship-Induced Waves and Currents in the Elbe Estuary. Canadian Hydraulics Centre, Controlled Technical Report HYD-CTR-039, Anlagen A-E.
- Oebius, H. (1998): Ein Abriss der Geschichte der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, zwischen 1884 und 1945. Mitteilungsblatt der BAW Nr. 78, S. 27-44.
- Sponholz, J. (2011): Optimierung der Flachwasser – Manöviereigenschaften eines Schiffmodells des Ship Handling Simulator auf Grundlage einer Serie von Versuchsfahrten mit einem Maßstabsmodell. Diplomarbeit, Hochschule Bremen.

Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Jansch, H.; Kersten, Th. (2016): Entwicklung und Betrieb eines automatisierten Laserscanning-Systems zum Monitoring von Bühnen an der Elbe. Tagungsband 15. Oldenburger 3D-Tage, IAPG JadeHochschule.

Uliczka, K. (2000): Zum Squat im hydraulischen Modell. Tagungsband Squat-Workshop, FH Oldenburg/ Elsfleth.

Uliczka, K.; Kondziella, B.; Flügge, G. (2004): Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe in seitlich begrenztem extremen Flachwasser. HANSA, 141. Jhg., Nr. 1, S. 59-65.

Uliczka, K.; Wezel, M. (2005): Dynamisches Fahrverhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt auf der Unter- und Außenelbe. Tagungsband HTG-Kongress 2005.

Uliczka, K.; Kondziella, B. (2009): Research on Ship Dynamics of large Containerships in confined Fairways. Conference Proceedings International Conference on Ship Manoeuvring in shallow and confined Water: Bank Effects, Edit. K. Eloot et M. Vantorre, © RINA/Ghent University/FHR.

Uliczka, K.; Kondziella, B. (2013): Auswirkungen der Schiffsgrößenentwicklung auf Seeschiffahrtsstraßen. Vortrag beim BAW-Kolloquium am 19.09.2013.

Uliczka, K.; Gätje, B. (2015): Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße – Pilotprojekt zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juelsand. Vortrag beim BAW-Kolloquium am 18.06.2015.

Von Morgenstern, H. (2007a): Usability and Limitations of Ship Handling Simulators for the Fairway Design Process. Expertise.

Von Morgenstern, H. (2007b): Usability and Limitations of Ship Handling Simulators for the Fairway Design Process – Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei Bemessungsaufgaben in Seeschiffahrtsstraßen. PART/TEIL B. Expertise.

Von Morgenstern, H. (2008): Beitrag zur Qualitätsprüfung von Schiffssimulatoren durch die BAW. Teil A bis E, Expertise.

Webster, W. C., Editor (1992): Shiphandling Simulation – Application to Waterway Design. National Academy Press, Washington D.C., USA.