

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Flügge, Gerd; Uliczka, Klemens

Schiffsbedingte Wellen unter den spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104136>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Flügge, Gerd; Uliczka, Klemens (1996): Schiffsbedingte Wellen unter den spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wellen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 9. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 75-90.

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.



Schiffsbedingte Wellen unter den spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen

Dr.-Ing. G. Flügge
Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste - Hamburg
Dr.-Ing. K. Uliczka
Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste - Hamburg

Vorbemerkung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als das zentrale Forschungsinstitut der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung u.a. für Fragestellungen auf dem Gebiet des Wasserbaus führt im Rahmen von Neubau-, Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen Untersuchungen zur schiffserzeugten Belastung von Bundeswasserstraßen durch. Die Außenstelle Küste (AK) der BAW mit der räumlichen Zuständigkeit für die Seewasserstraßen der Nord- und Ostsee bearbeitet u.a. die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff / Seewasserstraße und erstellte in den letzten Jahren u.a. Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung nach dem Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock sowie im Rahmen der Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen zu letztgenannten Projekten werden in diesem Fachbeitrag vorgestellt.

Grundlagen und Stand der Forschung

Bei der Fahrt eines Schiffes durch das Wasser treten infolge der Verdrängungsströmung und den auftretenden Druck- und Wasserspiegeländerungen an Bug, Heck und Schiffslängsseite Wellensysteme unterschiedlicher Periode auf. Sie können auch als sichtbare Größe des Schiffswiderstandes verstanden werden.

Der Schiffswiderstand und somit der Energieverbrauch nimmt mit der Fahrgeschwindigkeit überproportional zu und erreicht ein Maximum bei der kritischen Geschwindigkeit v_L , die näherungsweise der örtlichen Wellenfortschrittsgeschwindigkeit $c = \sqrt{g \cdot d}$ entspricht. Da aus wirtschaftlichen Gründen die Handelsschifffahrt im unterkritischen Bereich fährt, wird auf den kritischen und überkritischen Geschwindigkeitsbereich hier nicht eingegangen.

Die Schiffswellensysteme sind gekennzeichnet durch:

- die langperiodischen vorauslaufenden Schwallwellen,
- den Bugstau (s_B) direkt am Schiffskörper,

- den Absink (z_A) seitlich am Schiff,
- die Heckwelle als Teil des durch den Absink angeregten langperiodischen Primärwellensystems (H_P),
- die kurzperiodischen Sekundärwellen (H_S).

Die Wasserspiegeländerungen in tiefen- und seitenbegrenztem Fahrwasser - wie sich das Wellenbild für einen Betrachter vom Ufer aus darstellt - sind in Bild 1 mit einigen Einflußgrößen schematisch als Seitenansicht und in starker Überhöhung erläutert.

In ihrer zeitlichen Abfolge werden für einen am Ort stehenden Betrachter folgende Änderungen des Ruhewasserspiegels (RWS) deutlich: Schwallwelle mit Bugstau, Absink als Differenz von Bugstau (oder Schwallwelle) und maximalem Wasserspiegelabfall, Primärwelle (als Heckwelle) sowie das der ausschwingenden Primärwelle überlagerte Sekundärwellensystem.

Die kurzperiodischen Sekundärwellen entstehen - in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und besonders der Schiffsförm - durch die unterschiedlichen Druckverteilungen an Bug, vorderer und hinterer Schulter sowie Heck; eine detaillierte Beschreibung und graphische Darstellung der verschiedenen Komponenten der Schiffswellen und ihre Überlagerungen sowie der Einfluß der Schiffsförm sind bei SCHNEEKLUTH (1988) zu finden.

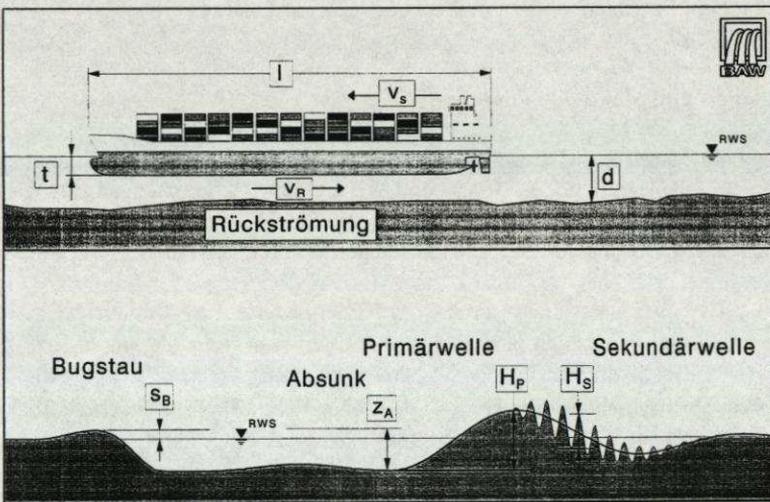


Bild 1: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme (stark überhöht) sowie einige Einflußgrößen

Die Größen der von fahrenden Schiffen erzeugten Wasserspiegelschwankungen und Strömungen sind eine Funktion

- von Schiffsgeschwindigkeit v_S und Passierabstand L
- der Schiffsabmessungen (Länge l , Breite b , Tiefgang t , eingetauchter Hauptspantquerschnitt A_S)
- vom Gesamtwiderstand des Schiffes (Schiffsform) im Kanal $R_{T,K}$
- der Fahrwasserverhältnisse (Wasserspiegel- B und Sohlbreite B_S , Wassertiefe d , Querprofilform und -fläche A , Uferform und Böschungsneigung $1:m$)
- der Strömungsverhältnisse in der Wasserstraße
- sonstiger Einflüsse, wie z.B. Krümmung, Antriebsart, Dichte des Wassers.

Anhand von Veröffentlichungen und eigener Untersuchungen haben sich als wesentliche Parameter für die schiffserzeugte Belastung in Seewasserstraßen

- die Schiffsgeschwindigkeit (v_S),
- der Passierabstand vom Ufer (L)
(der den hydraulisch wirksamen Teilquerschnitt A_T bestimmt) und
- das Verhältnis von Gesamtwassertiefe zur Tauchtiefe (d/t)
(mit A_T und b daraus das Teilquerschnittsverhältnis $A_T / 0.5 A_S$)
herausgestellt.

Der Einfluß des Passierabstandes vom Ufer wird anhand des schematischen Querprofils einer inhomogenen Seewasserstraße bei außermittiger Passage eines tiefgehenden Schiffes deutlich (Bild 2). Sehr vereinfacht lassen sich die physikalischen Vorgänge damit erläutern, daß die Wasserstraße durch das Schiff in zwei Teilquerschnitte getrennt wird, durch die das jeweils halbe Verdrängungsvolumen am Schiff vorbeigeführt wird. Das unterschiedliche Teilquerschnittsverhältnis $A_{T1} / 0.5 A_S$ und $A_{T2} / 0.5 A_S$ bedingt quantitativ ungleiche schiffserzeugte Belastungen an den jeweiligen Uferabschnitten.

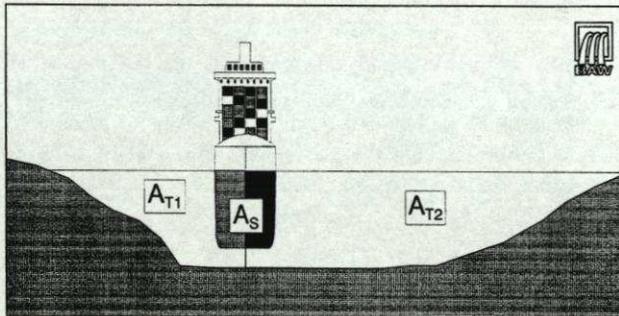


Bild 2: Schematische Darstellung der Teilquerschnitte einer inhomogenen Wasserstraße bei außermittiger Passage

Seit 1913, als KREY in seiner Arbeit „Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser“ die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge der Wasserspiegelabsenkung und Schiffsumströmung in Kanälen ausführlich beschrieben hat, wurde eine Vielzahl theoretischer und empirischer Ansätze zur Berechnung von Schiffswellenhöhe und Rückstromgeschwindigkeit entwickelt. Für die Prognose schiffserzeugter Belastungen in inhomogenen Seewasserstraßen sind neben der Wechselwirkung von Schiff zu Wasserstraße bei der Wellen- und Strömungsentstehung desweiteren Wellenausbreitungsprozesse wie u.a. Refraktion und Shoaling maßgebend, so daß die Einbeziehung dieser physikalischen Vorgänge in die Berechnung (ohne Parametrisierung) erforderlich wird.

Auf der Basis der heute zur Verfügung stehenden Rechner-Hardware sowie einer neuen Form der BOUSSINESQ-Gleichungen für die Ausbreitung windgenerierter Wellen in Flachwasser (NWOGU, 1993) war es möglich, Schiffswellen in tiefen- und seitenbegrenztem Wasser einschließlich der Wellenausbreitungsprozesse Refraktion, Shoaling, Diffraktion und Reflexion - bisher ohne Strömungsrefraktion - zu simulieren.

Berechnungen mit dem Programm WAKE2D des CANADIAN HYDRAULIC CENTER, NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA (NRC) wurden im Auftrag der BAW-AK im Rahmen der Untersuchungen an der Unterelbe vorgenommen. Derzeit rechnet das numerische Modell mit einer Tiefenrestriktion für die Tiefen-FROUDE-Zahl von $F_{n(d)} > 0,6$, so daß für einen gewählten Unterelbeabschnitt (vorerst constant auf 3 km das Querprofil Lüheanleger) nur Schiffsgeschwindigkeiten von $v_S \geq 15$ Kn als Eingangsgröße möglich waren. Das berechnete Wellenbild mit Flächen gleicher Wasserspiegelauslenkung für ein Containerschiff der IV. Generation PANMAX (Länge: 280 m; Breite: 32,2 m; Tiefgang: 13,8 m) als Aufkommer mit $v_S = 15$ Kn ist in Bild 3 dargestellt. Die Graphik zeigt deutlich u.a. den Einfluß der asymmetrischen Fahrt (höherer Absunk am Lüher Ufer) sowie der Unterwassertopographie (Refraktion an der Kante zum Wedelert Watt).

Vergleiche mit den Ergebnissen aus dem hydraulischen Modell der BAW-AK zeigen geringere Abweichungen der langperiodischen Wellen, aber eine deutliche Überschätzung der Sekundärwellen, was auf eine „zu grobe“ Auflösung (derzeit: 4 m x 4 m ; 337.500 Gitterelemente für 1,8 km x 3 km) zurückzuführen ist. Eine Weiterentwicklung des numerischen Programmes für $F_{n(d)} < 0,6$ sowie mit einer Auflösung von 2 m x 2 m ist von Seiten des NRC vorgesehen.

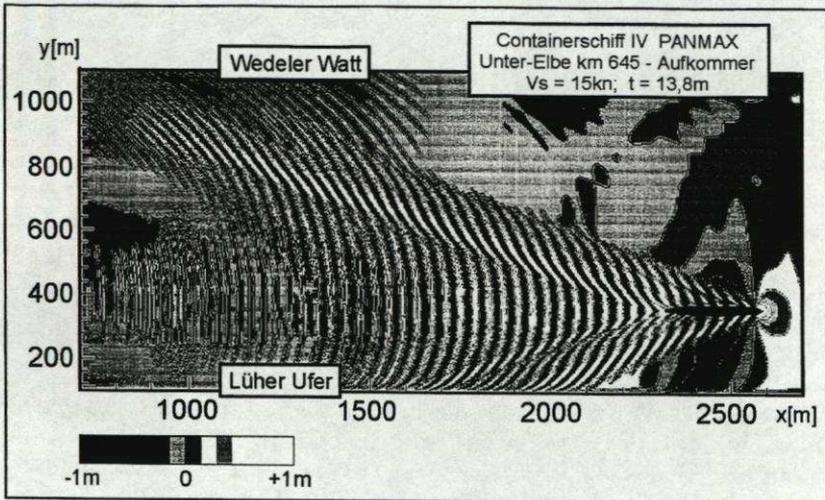


Bild 3: Isoflächenbild der Wasserspiegelauslenkung bei Passage eines Containerschiffes IV. PANMAX im Unterelbe-Querschnitt Lühe ($t = 13,8\text{m}$; $d = 18,5\text{ m}$; $v_s = 15\text{ Kn}$; Aufkommer), nach NRC (1996)

Für Fragestellungen hinsichtlich der Ermittlung ausbaubedingter Änderungen schiffserzeugter Belastungen in Seewasserstraßen, besonders für typische Schiffsgeschwindigkeiten tiefgehender Schiffseinheiten bei tideabhängiger Revierfahrt, ist die numerische Bearbeitung (z.B. mit WAKE2D) noch nicht als wissenschaftliches Hilfsmittel einzustufen.

Eine gesicherte, quantitative Prognose schiffserzeugter Belastungen in inhomogenen Wasserstraßen ist derzeit nur auf Basis von hydraulischen Modellversuchen in einem fachwissenschaftlich abgesicherten Modellmaßstab möglich.

Ergebnisse aus Modellversuchen für geplante Ausbaumaßnahmen von Seewasserstraßen

Die Untersuchungen der BAW-AK zu ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung im Seekanal Warnemünde und der Unter-Elbe wurden auf Basis der FROUDEschen Modellgesetze in hydraulischen Flächenmodellen mit dem Maßstab 1 : 40 ohne Strömung durchgeführt.

Die REYNOLDSzahlen lagen mit Werten von $R_n = 8 \cdot 10^5$ bis $4 \cdot 10^6$ (Warnemünde) und $R_n = 3 \cdot 10^6$ bis $8 \cdot 10^6$ (Unterelbe) deutlich über dem

Grenzwert zur Laminarströmung im Modell ($R_n < 10^5$; u.a. SCHNEEKLUTH, 1988).

Die Naturähnlichkeit der Wellenentstehung und -ausbreitung in den hydraulischen Modellen ist mit dem Maßstab 1 : 40 hinsichtlich der hydrodynamischen Ähnlichkeitsbedingungen ($d_{\text{MODELL}} > 5 \text{ cm}$, $T_{\text{MODELL}} > 0,7 \text{ s}$) für langperiodische Wellen sehr gut erfüllt (KOBUS, 1984).

Für ausgeprägte Sekundärwellen ($H_{\text{MODELL}} > 2 \text{ cm}$, $T_{\text{MODELL}} > 0,4 \text{ s}$) sind die Ähnlichkeitsbedingungen ab Schiffsgeschwindigkeiten von über $v_s = 14 \text{ Kn}$, abhängig vom Schiffstyp, voll gegeben. Damit ist die Prognosefähigkeit der Untersuchungen sichergestellt.

In den hydraulischen Modellen wurden die Wasserspiegelauslenkungen mit WAVE METER, DHI 102E, Wellenpegel DHI 202/60 des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE, Meßbereich: $\pm 12,5 \text{ cm}$ (Modell) gemessen.

Die schiffserzeugten Strömungen sind mit 2D-Type „E“ E.M.S. von DELFT HYDRAULICS, Meßbereich: $\pm 100 \text{ cm/s}$ (Modell) erfaßt worden. Die örtliche Schiffsgeschwindigkeit wurde über Reflexlichtschranken in Verbindung mit Reflektoren auf dem Schiff ermittelt, Genauigkeit: $< 0,1 \text{ Kn}$ (Natur).

Durch Relativmessungen gegen den Ruhezustand sind systematische Meßgeräteenauigkeiten minimiert; die verfahrensbedingte Standardabweichung unter Einbeziehung der gesamten Meßkette betrug für die auf den Naturzustand bezogenen Ergebniswerte $\sigma < 0,05 \text{ m}$ bzw. $\sigma < 0,05 \text{ m/s}$.

*** Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock**

Das hydraulische Modell ZUFAHRT ZUM SEEHAFEN ROSTOCK erfaßte eine Fläche von etwa 6 km^2 mit einer Länge von etwa 4 km und einer Breite von rund $1,6 \text{ km}$. Die Abmessungen des Modells betragen etwa $100 \text{ m} \times 40 \text{ m}$. Neben den Untersuchungen zur schiffserzeugten Belastung wurden vornehmlich Seegangsuntersuchungen zur Optimierung des äußeren Molensystems nach Abriß der heutigen Mittelmole und Ausbau des Seekanals auf eine Sohlbreite von 120 m und einer Tiefe von ca. 15 m vorgenommen. Auf die letzteren Untersuchungen wird hier nicht weiter eingegangen.

Die Modellfamilie der zu untersuchenden Schiffseinheiten bestand zum einen aus Exemplaren konventioneller Bauart aus Beständen der FORSCHUNGSANSTALT FÜR SCHIFFFAHRT, WASSER- UND GRUNDBAU (FAS) in Berlin (45.000 dwt, 65.000 dwt und 100.000 dwt-Massengutschiffe) sowie aus dem Modell eines modernen 120.000 dwt-Massengutschiffes und einer modernen Schnellfähre. Die Modellschiffe wurden als funkferngeschaltete Selbstfahrer bei feststehendem

Ruder mit zusätzlicher Kursstabilisierung (Führung am Stahlseil) auf festem Kurs gefahren.

Aus der Vielzahl der Untersuchungen wird die schiffserzeugte Belastung im Alten Strom von Warnemünde nach Ausbau des Seekanals, Einbau der Molenvariante mit neuer Ostmole, der neuen Westmolenspange und nach Abriß der heutigen Mittelmole vorgestellt. Beispielhaft wurden die zu erwartenden Wasserspiegelschwankungen bei Passage eines 100.000 dwt-Massengutschiffes (M100; Länge: $l = 282$ m; Breite: $b = 39$ m; Tiefgang: $t = 13$ m) im Seekanal ausgewählt (Bild 4).

Die Zeitreihen der Wellenpegel an der Einfahrt des Seekanals (Pos. I) und an der Westmole (Pos. II) sowie der Sonden im Alten Strom (Pos. III, IV, V) verdeutlichen die Wellenverformung des Ausgangssignals im Nahbereich des Schiffes durch Refraktion, Diffraktion, Shoaling und hier besonders der Reflexion im angeschlossenen Hafenbecken. Ausgehend vom Wellensignal im Seekanal (Bild 4; Pos. I) führen Überlagerungen der reflektierten Welle im Alten Strom durch die ungünstige langgestreckte Form zu Amplituden bis zu einem zweifachen der Eingangswelle (Bild 4; Pos. IV).

Das Maximum der Beckenschwingungen tritt etwa 15 bis 20 Minuten nach dem Absunkereignis auf und ist erst nach etwa 45 Minuten auf Werte unter $H < 0,1$ m abgeklungen. Die wellenerzeugte oszillierende Strömungsgeschwindigkeit im Alten Strom kann bei Schiffsgeschwindigkeiten des M 100 im neuen Seekanal von $v_s = 6$ Kn bis 7 Kn Werte von $v = 0,6$ m/s erreichen. Die Schwingungsperiode liegt bei etwa 4 bis 5 Minuten.

Bei geringeren Schiffsgeschwindigkeiten großer Schiffe im Seekanal treten jeweils überproportional geringere Wasserspiegelauslenkungen und welleninduzierte oszillierende Strömungen im Alten Strom auf. Die Beckenschwingungen im Alten Strom, angeregt von äußeren Ereignissen, treten auch schon heute - vor dem Ausbau des Seekanals - auf.

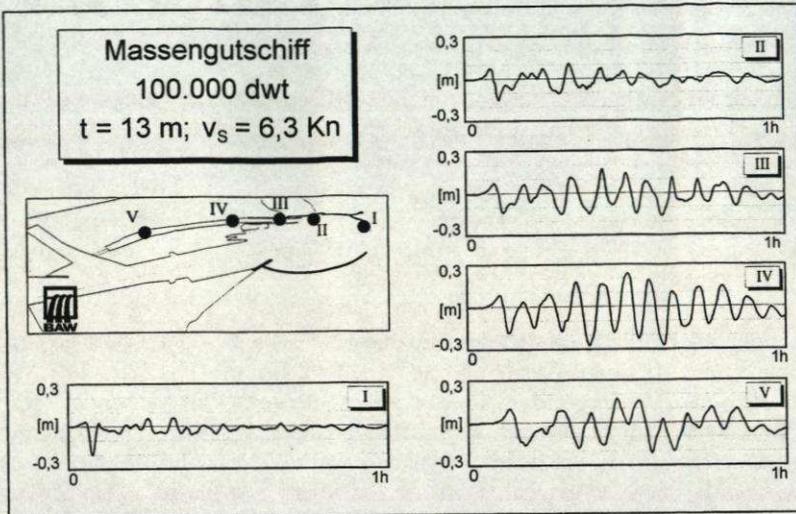


Bild 4: Schiffserzeugte Wasserspiegelauslenkung im Seekanal Warnemünde (Zufahrt zum Seehafen Rostock) und im Alten Strom nach Abriß der Mittelmole und Neubau der neuen Ostmole und einer Westmolenspange (M100, $t = 13 \text{ m}$, $v_s = 6,3 \text{ Kn}$)

* Ausbau der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe

Für die Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastungen im hydraulischen Modell wurde als Untersuchungsabschnitt das komplexe System der Unterelbe an der Lühemündung gewählt, da folgende Randbedingungen gegeben sind:

– am LÜHER UFER:

- Außenkrümmung und geringer Passierabstand
- Steilufer (Teilreflexion)
- Deckwerke und Bühnenfelder (Reflexion, Refraktion, Shoaling)
- Schiffsanleger und Sturmflutsperrwerk (Reflexion, Belastung)
- Nebenflußmündung (Refraktion, Diffraktion, Translation)

– am WEDELER WATT:

- Innenkrümmung und großer Passierabstand
- Flachwasser (Teilreflexion, Refraktion, Shoaling, Belastung)
- Strombuhnen (Diffraktion, Reflexion)
- Steiler Fahrinnenrand bei T_{nw} (Reflexion).

Das hydraulische Modell erfaßt einen Elbe-Ausschnitt von etwa $1,8 \text{ km}^2$ (Strom-km 644,6 bis km 645,2; Peildaten 1992), wobei das Wedeler Watt bis zu Höhenkoten von etwa NN nachgebildet wurde. Das Versuchsbecken mit Beschleunigungs- und Stoppstrecken hat die Ausmaße von etwa $100 \text{ m} \times 35 \text{ m}$.

Zu den untersuchten Modellschiffen zählte zum einen das konventionelle großes Güterschiff mit 45.000 dwt aus Beständen der FAS sowie ein modernes Containerschiff der II. Generation als Feederschiff, ein Containerschiff der IV. Generation aus der PANMAX-Klasse (ca. 4.000 TEU; $l = 280 \text{ m}$; $b = 32,2 \text{ m}$; $t = 13,8 \text{ m}$; $c_B = 0,695$) und ein Containerschiff der POST-PANMAX-Klasse (ca. 4.800 TEU; $l = 280 \text{ m}$; $b = 40 \text{ m}$; $t = 14 \text{ m}$; $c_B = 0,680$).

Die Fahrachse wurde auf 60 m parallel zur Fahrrinnenbegrenzung festgelegt, so daß der Passierabstand für Aufkommer zum Anleger Lühe etwa $L \approx 220 \text{ m}$ und für Abgänger zum Bühnenkopf der Wedeler Strombühne rund $L \approx 410 \text{ m}$ betrug. Der Einfluß der Kurvenfahrt auf das örtliche Wellenbild und die Strömungsvorgänge wurde durch Messungen bei Freifahrten mit Steuermann und anhand von Driftwinkelversuchen im Vergleich zur Seilfahrt ermittelt. Die Differenzen der schiffserzeugten Belastungen im Meßquerschnitt waren vernachlässigbar klein, so daß es durch Ausschalten des „Freiheitsgrades Mensch“ wissenschaftlich und wirtschaftlich vorteilhafter war, alle weiteren Versuche mit am Stahlseil geführten, funkferngeschalteten Selbstfahrern und feststehendem Ruder durchzuführen, um so desweiteren ein hohes Maß in der geometrischen Systemgenauigkeit (z.B. gleicher Passierabstand) zu erreichen.

Die Auswirkungen der dynamischen Stabilität (hier: Krängung) waren ohne Kurvenfahrt, Seegang und Tide-Strömung zu vernachlässigen; die Modellschiffe wurden zur Minimierung von zufallsabhängigen äußeren Einflüssen auf die Schiffsbewegung, dementsprechend auch auf die schiffserzeugte Belastung, „hart getrimmt“.

Anhand von Passagen des Containerschiffse IV. PANMAX beim IST-Zustand und AUSBAU-Zustand als Aufkommer wird der Einfluß der Schiffsgeschwindigkeit ($v_S = 11,4 \text{ Kn}$ bzw. $v_S = 15,1 \text{ Kn}$), des Passierabstandes (somit der wirksamen Teilquerschnitte), der Tiefgangszunahme ($t_{IST} = 12,8 \text{ m}$; $t_{AUSBAU} = 13,8 \text{ m}$) und der Kurvenaufweitung am nördlichen Fahrrinnenrand (schwarze Fläche) deutlich (Bilder 5 und 6).

Beim geschwindigkeitsabhängigen Absunk, aufgetragen über das Querprofil der Elbe (Bild 5; links: Lüher Ufer; rechts: Wedeler Watt), zeigt sich anschaulich

- der überproportionale starke Anstieg der Wellenhöhe bei Geschwindigkeiten von $v_S \approx 15 \text{ Kn}$ im Vergleich zu $v_S \approx 11 \text{ Kn}$,

- die asymmetrische Belastung des Elbequerschnitts,
- das Wellenaufsteilen am steilen linken und flachen rechten Ufer (Shoaling),
- die Zunahme der Uferbelastung auf Lüher Seite bei hoher Schiffsgeschwindigkeit um etwa 16% infolge Tiefgangszunahme ($\Delta t = 1$ m) sowie
- die Kompensation der Tiefgangszunahme am rechten Ufer (Wedeler Watt) durch den Ausbau der Innenkurve.

Containerschiff der IV. Generation PANMAX Absenk - IST/Ausbau -Zustand

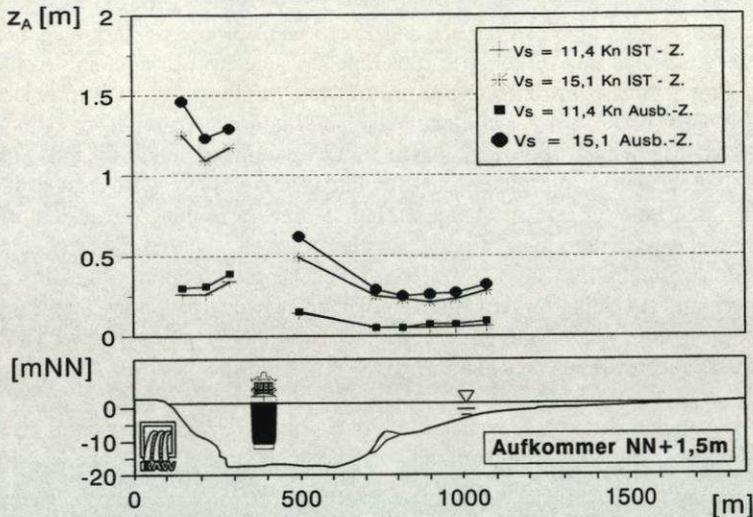


Bild 5: Geschwindigkeitsabhängiger Absenk z_A ($v_S = 11,4$ Kn / $15,1$ Kn) bei Passagen des Containerschiffes IV. PANMAX als Aufkommer für den IST-Zustand ($t = 12,8$ m) und den AUSBAU-Zustand ($t = 13,8$ m)

Die gleichen physikalischen Prozesse werden bei der Auftragung der geschwindigkeitsabhängigen schiffserzeugten Rückstromgeschwindigkeit offenkundig (Bild 6):

- Die Rückströmung am Lüher Ufer beträgt bei Passagen eines Aufkommers ein mehrfaches der Strömungsbelastung des Wedeler Watts.

- Die Tiefgangszunahme der Containerschiffe um $\Delta t = 1$ m verursacht bei geringem Passierabstand und hoher Schiffsgeschwindigkeit ein Anstieg der schiffserzeugten Strömungsgeschwindigkeit um etwa $\Delta v_R \approx 0,2$ m/s.
- Bei der geringeren Schiffsgeschwindigkeit ist der Einfluß des größeren Schiffstiefganges auf die Verdrängungsströmung zu vernachlässigen.

Containerschiff der IV. Generation PANMAX Rückströmung - IST/Ausbau-Zustand

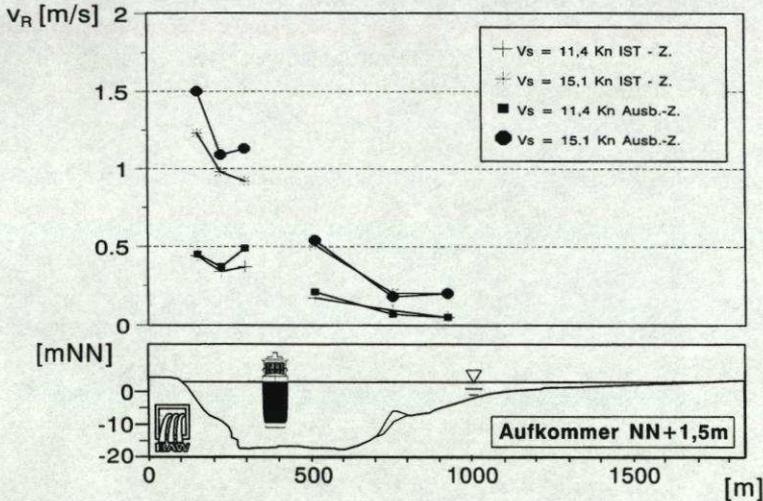


Bild 6: Geschwindigkeitsabhängige Rückströmung v_R ($v_s = 11,4$ Kn / $15,1$ Kn) bei Passage des Containerschiffes IV. PANMAX als Aufkommer für den IST-Zustand ($t = 12,8$ m) und den AUSBAU-Zustand ($t = 13,8$ m)

Anhand der Untersuchungen der schiffserzeugten Belastungen im hydraulischen Modell des Elbe-Abschnitts Lühe wurde erneut ersichtlich, daß ausbaubedingte, tiefgangsabhängige Änderungen derzeit nur exakt für die jeweils gewählte Unterwassertopographie zu bestimmen sind. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Randbedingungen (Schiffseinheiten, Querschnitte, Passierabstand etc.) kann nur eine qualitative Abschätzung sein.

Forschungsbedarf im Bereich der Seewasserstraßen

Die Erfassung schiffserzeugter Belastungen in Seewasserstraßen hinsichtlich lang- und kurzperiodischer Schiffswellen sowie ufernaher Verdrängungsströmung ist durch den Einsatz von Untersuchungen in der Natur und in hydraulischen Modellen als Stand der Technik zu werten.

Die Entwicklung brauchbarer numerischer Modelle zur Berechnung der Belastungen auch bei Änderungen der Unterwassertopographie (Ausbau- oder Umbauvorhaben) für revierübliche Schiffsgeschwindigkeiten (z.B. Unterelbe für $F_{n(d)} < 0,6$) wird weiter fortgesetzt, bedarf aber zusätzlich der Unterstützung durch Verifikationsdaten für klar definierte Randbedingungen, die nur hydraulische Modellversuche in geeignetem Maßstab liefern können.

Forschungsbedarf wird zum einen auf dem Gebiet der strömungsinduzierten Wellenverformung und zum anderen vornehmlich auf dem Gebiet der Strömungs- und Turbulenzprozesse zwischen Schiffskörper und Sohle sowie deren Einfluß auf den Sedimenttransport gesehen.

Zu letzterem wurden bei der BAW-AK zum einen erste Feldversuche mit einer Automatischen Meßstation (AUME) im Rahmen von Messungen der schiffserzeugten Belastung der Untertrave durch große Frachtfähren vorgenommen, zum anderen werden erste Messungen im hydraulischen Modell der Unter-Elbe zu diesem Themenbereich bei Passagen eines Containerschiffes IV. PANMAX vorgestellt:

Zur Erfassung der dreidimensionalen Strömungsverhältnisse unter dem Schiff wurde im hydraulischen Modell ein Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) von SONTEK, USA mit Winkelkopfstück, Meßbereich: ± 250 cm/s, eingesetzt. Die Druckverhältnisse an der Sohle wurden mit PTX 164 Druckaufnehmern von DRUCK Meßtechnik, Meßbereich: 0 - 350 mbar registriert.

Der Einsatz hochauflösender, akustischer 3D-Unterwasserströmungs sonden ermöglicht einen Einblick in die Komponenten der Verdrängungsströmung in ihrer Wechselwirkung zu Sohle und Querprofil sowie die Wirkung des Schraubenstrahls auf die Sohle auch während der Fahrt.

Als ein Beispiel sind die Längs-, Quer- und Vertikalkomponenten der schiffserzeugten Strömung mittig zwischen einem aufkommenden Containerschiff IV. PANMAX ($l = 280$ m; $b = 32,2$ m; $t = 13,8$ m; $d/t = 1,4$; $\Delta d - t_{RUHE} = 4,7$ m) und Sohle (IST-Zustand) bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S = 15$ Kn aufgetragen (Bild 7). Die Zeitreihen sind zu Darstellungszwecken mit einem gleitenden, gewichteten Mittel über 1,6 Sekunden (Natur) bearbeitet.

Containerschiff der IV. Generation PANMAX 3D-Strömung zwischen Schiff und Sohle

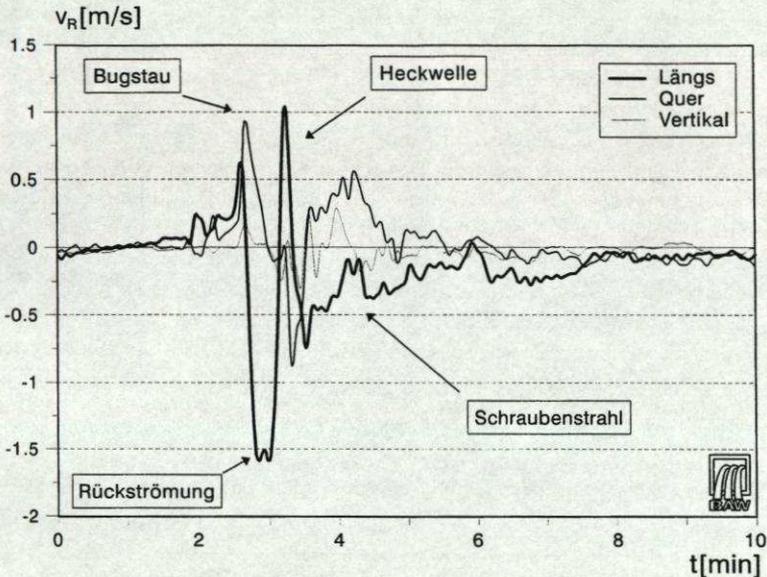


Bild 7: Dreidimensionale Strömung zwischen Containerschiff IV. PANMAX und Sohle ($d/t = 1,4$; $v_s = 15$ Kn; Aufkommer; Unter-Elbe km 645)

Dominierend ist die Längskomponente mit den maximalen Amplitude der Rückstromgeschwindigkeit von $v_{Ry} \approx 1,6$ m/s. Unter dem Bug des Containerschiffes erreicht die Querkomponente in Richtung der Fahrrinne ihr Maximum mit $v_{Sx} \approx 0,9$ m/s. Ein zweiter hoher Wert von $v_{Sx} \approx 0,5$ m/s wird innerhalb des Schraubenstrahles erreicht, der aufgrund der rechtsdrehenden Schraube ebenfalls in Richtung Fahrrinne gerichtet ist und im Meßvolumen mit den Maxima etwa 300 bis 400 m hinter dem Schiff wirksam wird. Die Vertikalkomponente ist unter dem Schiff gering und erreicht im Schraubenstrahl Werte bis etwa $v_{Sz} \approx 0,3$ m/s.

Die Erfassung der Druckverhältnisse unter dem Schiffskörper ist hinsichtlich des Sedimenttransportes von besonderer Bedeutung, da eine momentane Abminderung des Porenwasserüberdruckes im Boden zur „Auflockerung“ des anstehenden (rolligen, kurzzeitig spannungsfrei gelagerten) Materials führt, so daß der sohlnahe Sedimenttransport durch die Verdrängungsströmung zusätzlich begünstigt wird. Diese bodendynamischen Vorgänge sind nicht nur an der Sohle, sondern auch absunkbedingt an den Uferböschungen meßbar, wie Untersuchungen

der BAW im Binnenbereich zeigten (SCHULZ/KÖHLER, 1986; HEIBAUM, 1996).

Eine geschwindigkeitsabhängige Auftragung (Bild 8) der resultierenden Strömungsmaxima (linke Achse) und der maximalen Druckminderung (rechte Achse) zwischen Containerschiff IV. PANMAX und Sohle verdeutlicht, daß Druckminderungen unter dem Schiff Größenordnungen der Absunkwerte am Lüher Ufer erreichen können (vergl. Bild 5). Die Strömungsgeschwindigkeit zwischen Schiff und Sohle erreicht bei Schiffsgeschwindigkeiten von $11 \text{ Kn} < v_s < 15 \text{ Kn}$ Werte von etwa 130 % bis 140 % der Rückströmung seitlich des Schiffes (vergl. Bild 6). Der geschwindigkeitsabhängige Kurvenverlauf von Druckänderung und zeitsynchroner Strömung (Bild 8) verdeutlicht, daß die Druckänderung unter dem Schiff nach anfänglich gleichem stetigen Verlauf wie die Strömungsgeschwindigkeit ab Schiffsgeschwindigkeiten von annähernd $v_s \approx 12 \text{ Kn}$ einen deutlich stärkeren Anstieg verzeichnet, was entsprechend auch höhere Sogkräfte zur Folge haben muß.

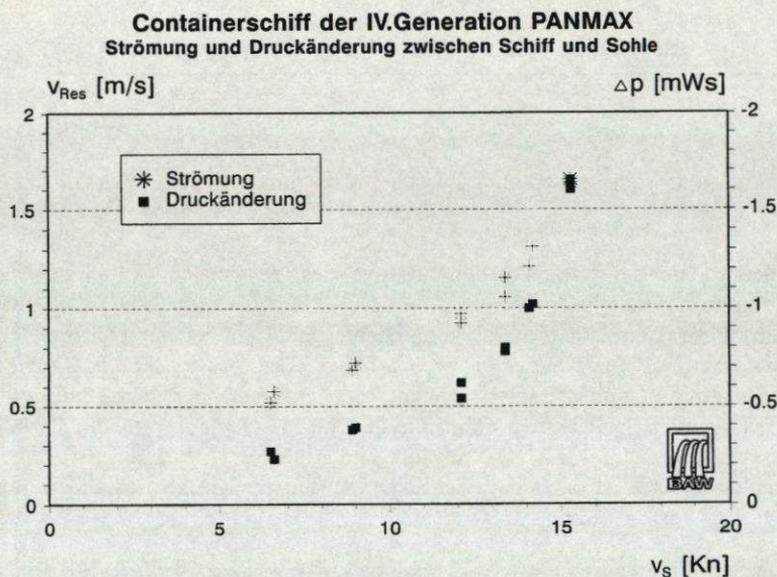


Bild 8: Geschwindigkeitsabhängige resultierende Strömungsgeschwindigkeit (linke Achse) und maximale Druckabminderung (rechte Achse) zwischen Containerschiff IV. PANMAX ($d/t = 1,4$; Aufkommer; Unter-Elbe km 645)

Die detaillierte Erfassung der sohnahen physikalischen Prozesse zwischen Schiff und Sohle und ihre quantitative Einordnung in den Gesamtprozeß des Sedimenttransportes in Seewasserstraßen wird in der BAW als ein schwerpunktmäßig zu bearbeitender Teilbereich der zukünftigen Forschung angesehen.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine gesicherte, quantitative Prognose schiffserzeugter Wellen und Strömungen unter den spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen ist derzeit nur auf Basis von hydraulischen Modellversuchen in einem fachwissenschaftlich abgesicherten Maßstab möglich. Erste Ansätze numerischer Verfahren unter Einbeziehung der Wellenverformungsgesetze bedürfen einer Weiterentwicklung auf revierübliche Schiffsgeschwindigkeiten.

Für die Wahrnehmung der Fachaufgaben der BAW-AK besteht Forschungsbedarf zum einen auf dem Gebiet der strömungsinduzierten Wellenverformung sowie im Bereich des schiffserzeugten Sedimenttransportes hinsichtlich der physikalischen Prozesse zwischen Schiff und Sohle sowie deren Einordnung in den Gesamtprozeß des Sedimenttransportes in Seewasserstraßen.

Literatur

- Heibaum, M. Stabilität von Deckwerken, Geotechnisches Kolloquium BAW-AK, Vortrag am 21.03.1996, Hamburg, 1996
- Kobus, H. (Hrsg.) Wasserbauliches Versuchswesen, DVWK-Schriften, Heft 39, Verlag Paul Parey, Hamburg / Berlin, 1984
- Krey, H. Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser, Sonderabdruck „Schiffbau“, XIV. Jahrgang, Verlag Carl Marfels, Berlin, 1913
- NRC Ship wave simulation with WAKE2D, National Research Council Canada, 1996. (unveröffentlicht)
- Nwogu, O. Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 6, ASCE, USA, 1993

-
- Schneekluth, H. Hydromechanik zum Schiffsentwurf . 3. Auflage, Koehlers Verlagsgesellschaft, Herford, 1988
- Schulz, H. Bemessung von Deckwerke unter Berücksichtigung von Geotextilien
- Köhler, H.-J. Third International Conference on Geotextiles, Wien, 1986

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. G. Flügge, Dr.-Ing. K. Uliczka
Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste - Hamburg
Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg