

Dynamisches Fahrverhalten extrem großer Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen

DR.-ING. KLEMENS ULICZKA / DIPL.-ING. (FH) BERNHARD KONZIELLA, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME I

Der weltweit kontinuierliche Zuwachs der Containerumschlagszahlen in den großen Häfen führte im letzten Jahrzehnt zu einer rasanten Schiffsgrößen-Entwicklung, sodass derzeit Schiffseinheiten mit einer maximalen Containerkapazität bis zu 8.000 TEU verkehren und Häfen wie z. B. Hamburg und Bremerhaven anlaufen. Im Hamburger Hafen werden u. a. Containerschiffe der Größe der CMS HAMBURG EXPRESS (7.506 TEU) von der Reederei HAPAG-LLOYD mit einer Länge $l = 320,4$ m und einer Breite von $b = 42,8$ m ($t_{\text{MAX}} = 14,5$ m) abgefertigt. Von Dezember 2002 bis Mai 2003 wurden indessen 22 Aufträge für Containerschiffe mit Kapazitäten > 8.000 TEU allein von deutschen Reedereien und Emissionshäusern meist bei Koreanischen Werften bestellt (DOBERT, 2003). Die Fachzeitschrift HANSA veröffentlichte in ihrer Ausgabe 8/2003 die Hauptdaten der bisher größten gebauten Containerschiffe, darunter mit Baujahr 2003 ein koreanisches Projekt mit einer Kapazität von 12.500 TEU bei einer Länge von $l < 390$ m, einer Breite $b = 54,2$ m bei einem Tiefgang von $t = 14,5$ m. Letztere Angaben werden durch Aussagen der Münchner CONTI-Gruppe - Nr. 4 unter den weltweit größten Containerschiffseignern - bestätigt, deren Geschäftsführer forderte, dass die nächste Generation der Containerriesen 10.000 bis 12.000 Stellplätze haben muss (HAMBURGER ABENDBLATT, 26. Aug. 2003). Sollen derart große Containerschiffe auf den Seeschiffahrtsstraßen verkehren, sind für die Ermittlung der erforderlichen Fahrrinntiefe die bisher verwendeten Berechnungsansätze für Squat und Trimm bei Revierfahrt (extreme Flachwasserbedingungen) zu verifizieren.

In der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden Grundsatzuntersuchungen für Ausbauplanungen und die wirtschaftliche Nutzung der vorhandenen Wassertiefen unter Berücksichtigung der nautischen Sicherheit durchgeführt. Zur Beurteilung der nautischen Sicherheit ist es erforderlich, das dynamische Fahrverhalten der sehr großen Containerschiffe auch unter Grenzbedingungen, d. h. unter extremen Flachwasserbedingungen bis hin zum Aufsetzen, sicher beurteilen zu können. Derartige Untersuchungen sind nach Stand von Technik und Wissenschaft bisher nur in hydraulischen Modellversuchen möglich.

Die Grundlagenuntersuchungen zur Schiffsdynamik sehr großer Containerschiffe im extremen Flachwasser wurden vom Forschungskordinator Küste LBD/Dr.-Ing. Flügge initiiert und fachlich begleitet.

Grundlagen

Der Fachbegriff „Dynamisches Fahrverhalten“ wird im Folgenden reduziert auf die vertikalen Bewegungen des Schiffs wie Squat und Trimm in Wechselwirkung mit der Schiffsgröße, der Schiffsgeschwindigkeit und den Fahrwasserbedingungen. Bei der Fahrt eines Schiffs durch das Wasser treten infolge der verursachten Verdrängungsströmung (BERNOULLI-Strömung) und der auftretenden Druck- und Wasserspiegeländerungen an Bug, Schiffslängsseite und Heck langperiodische Primär- und kurzperiodische Sekundär-Wellensysteme auf. Der **Squat S** ist die Absenkung des fahrenden Schiffes mit dem Primär-Wellen-System und der **Trimmwinkel Θ** die Verdrehung des Schiffes um die Querachse. **Seitlich unbegrenztes Flachwasser** wurde angelehnt an ICORELS (1997) definiert: Die Wassertiefe h ist deutlich geringer als der 2fache Schiffstiefgang t , die hydraulisch wirksame Breite w des Fahrwasserquerschnitts ist größer als das 10fache der Schiffsbreite b . **Seitlich begrenztes Flachwasser** wird bei mittiger Fahrt über das Querschnittsverhältnis n ($n = A / A_S$) und bei außermittiger Fahrt über das Teilquerschnittsverhältnis n_T beschrieben. Bei den folgenden Auftragungen werden Squat und Trimm nicht besonders getrennt, sondern als **Bug-„Squat“** und **Heck-„Squat“** aufgetragen. Für eine Fahrrinnenbemessung ist die Bestimmung des tiefsten Punktes eines fahrenden Schiffes ausschlaggebend.

Untersuchungskonzept

Ziel der Untersuchungen ist es, der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung (WSV) für konkrete Ausbauplanungen und für die wirtschaftliche Nutzung der Seeschiffahrtsstraßen (Tidefahrpläne) die geschwindigkeits-, wasserstands- und tiefgangsabhängigen Parameter **Squat und Trimm** zur Festlegung der Fahrrinntiefen zur Verfügung zu stellen. Das Untersuchungskonzept setzt sich aus drei Teilprojekten zusammen:

- I. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt über eine feste, ebene Sohle in seitlich unbegrenztem Flachwasser (Einfluss des Flachwassereffekts; ULICZKA / FLÜGGE, 2001)
- II. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt über eine feste Sohle mit Transportkörpern in seitlich unbegrenztem Flachwasser (FLÜGGE / ULICZKA, 2001, 2001b)

Bezeichnung	Länge	Breite	Tiefgang	UKC _R *	c _B -Wert**	SG ⁺	KG ⁺⁺
-	m	m	m	m	-	-	m
JUMBO	320	40	14,5	2	0,740	6,29	11,8
MEGA-JUMBO	360	55	16,0	1-1,5 - 2	0,677	6,10	10,2

* UKC_R : Under-Keel-Clearance in Ruhe ** c_B : Blockkoeffizient + SG : Schlankheitsgrad

++ KG: Gewichtsschwerpunkt über Kiel

Tabelle 1: Schiffsdynamische Parameter der untersuchten Schiffe

III. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt im Revier mit seitlich begrenztem extremen Flachwasser.

Die Systemuntersuchungen liefern Fahrkurven für große Containerschiffe mit genauen Squat- und Trimmwerten, die auf Grund der untersuchten Grenzbedingungen (Maximalabmessungen) auf der sicheren Seite liegen. In dieser Veröffentlichung werden einzelne Beispiele der Teilprojekte II und III vorgestellt.

Untersuchungsmethode hydraulischer Modellversuch

Auf die Wahl der Untersuchungsmethode wurde in früheren Veröffentlichungen vertieft eingegangen (u. a. FLÜGGE / ULICZKA, 2001), sodass hier nur nochmals zusammenfassend festgestellt wird, dass **analytische und empirische Ansätze** zur Berechnung des Squats jeweils nur zur Abschätzung des Squats unter den angegebenen Grenzbedingungen, für die sie ermittelt wurden, verwendet werden sollten. **Naturmessungen** sind für **systematische Untersuchungen** von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Belastungen **unwirtschaftlich**. Zur **zusätzlichen Absicherung** von Modellversuchen sind Messungen einzelner Passagen großer Containerschiffe bei Revierfahrt **sinnvoll**, doch sind Extremzustände mit geringer Kieffreiheit (UKC) selten zu erreichen. Die auch von der BAW unterstützte Entwicklung **hydrodynamisch-numerischer Modellverfahren** im Grenzbereich zwischen Schiffbau und Wasserbau verspricht in absehbarer Zeit die Möglichkeit, Fragestellungen zur Schiffsdynamik in extremen Flachwasser auch bei den besonderen Bedingungen der Revierfahrt mittels dieser Methode zu bearbeiten (ULICZKA, 2002). Systematische Untersuchungen zur gesicherten, quantitativen Prognose des geschwindigkeits- und tiefgangsabhängigen Squats im extremen Flachwasser bis hin zur Grundberührung sind derzeit nur bei exakt steuerbaren Randbedingungen möglich, wie sie die Methode des **hydraulischen Modellversuchs in fachlich abgesicherten Modellmaßstäben** bietet.

Die Untersuchungen der BAW wurden in einem Flachwasserbecken mit der Länge von 100 m und der Breite von 35 m (max. Wassertiefe 0,7 m) vorgenommen. Der gewählte Modellmaßstab betrug 1:40. Die schiffsdynamischen Parameter des untersuchten großen PPM-Containerschiffs (**JUMBO**) und des extrem großen PPM-Containerschiffs der Zukunft (**MEGA-JUMBO**) sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Die Modellschiffe führen als funkferngeschaltete, seilgeführte Selbstfahrer mit eigenem Propellerantrieb. Schiffsgeschwindigkeit, Squat und Trimm wurden u. a. lokal nach einem laser-geometrischen Verfahren registriert, zusätzlich wurde die Schiffsdynamik auf der gesamten Beckenlänge mittels eines Laser-Zielplatten-Systems erfasst (FLÜGGE / ULICZKA, 2001).

Die im hydraulischen Modell untersuchten **Sohlstrukturen** sind aus der Analyse von Fahrwasserpeilungen abgeleitet und wurden zur Eingrenzung der verschiedensten Formen, Längen und Höhen von Transportkörpern (TK) in der Natur zu TK-Längen von $\lambda_{TK} = 50$ m, 75 m und 100 m bei gleicher Höhe von $H = 4$ m gewählt. Die strukturierte Sohlbreite entsprach dem 4fachen der Schiffsbreite des MEGA-JUMBO-Containerschiffs. Das **seitlich begrenzte** Flachwasser wurde durch den Einsatz flexibler Böschungen auf Wasserstraßenquerschnitte von $n = 26$ bis zu $n = 10$ modelliert (Parameter für den MEGA-JUMBO). Die für hydraulische Modellversuche notwendigen Ähnlichkeitsbedingungen waren durch die Wahl des Modellmaßstabes 1:40 ($l_{MODELL} = 8$ m bzw. 9 m; $0,6$ m/s $< v_{S,MODELL} < 1,4$ m/s) sowie der Einhaltung des FROUDESchen Gesetzes und der REYNOLDSschen Randbedingungen (Faktor > 10 über Re_{krit}) voll erfüllt. Die Prognosefähigkeit der Versuche war somit gegeben.

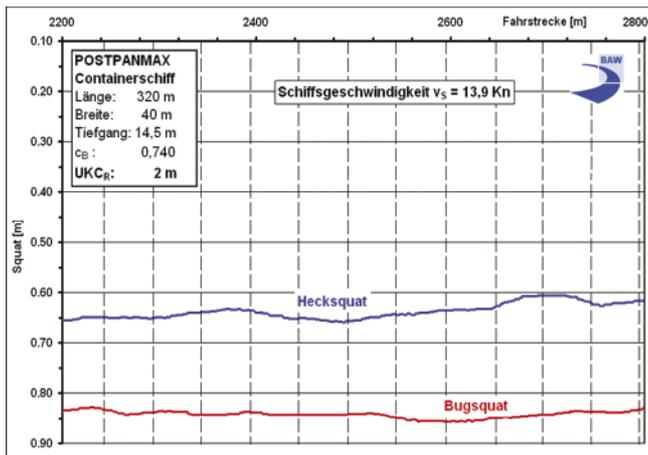


Bild 1a

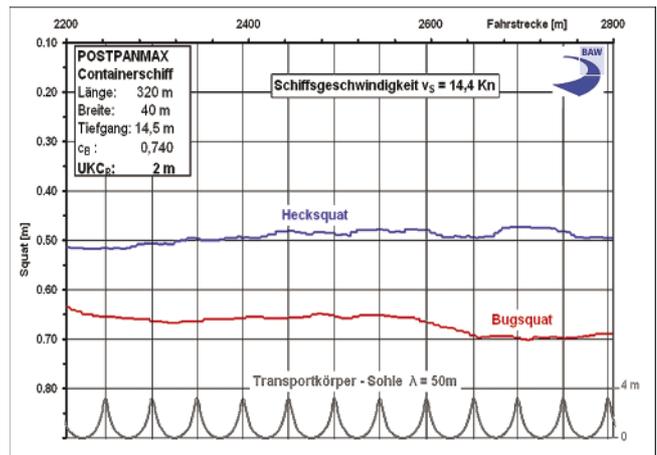


Bild 1b

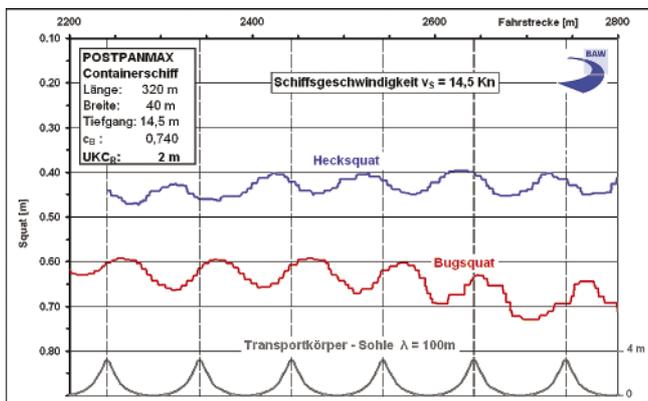


Bild 1c

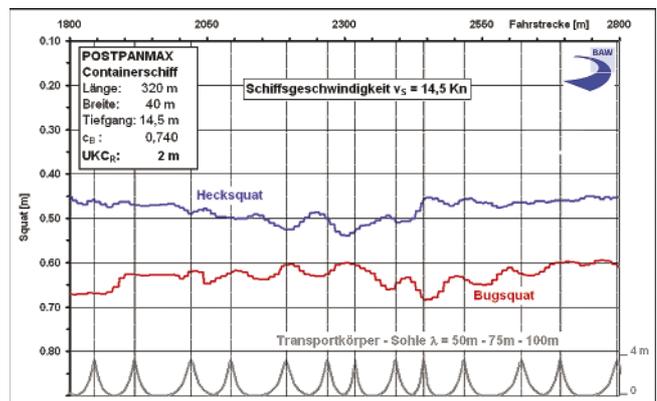


Bild 1d

Bild 1: Fahrtdynamisches Verhalten des JUMBO bei Fahrt über verschiedene Sohlformen
 Bild 1a: ebene Sohle; Bild 1b: $\lambda = 50$ m; Bild 1c: $\lambda = 100$ m; Bild 1d: $\lambda = 50 - 75 - 100$ m
 bei einer $UKC_R = 2$ m und rund $v_s \approx 14$ Kn in seitlich unbegrenztem Flachwasser

Ausgewählte Ergebnisse Fahrt über Transportkörperstrecken

Das fahrdynamische Verhalten eines extrem großen Containerschiffs bei Fahrt über verschiedene Sohlformen bei seitlich unbegrenztem Flachwasser ist in Bild 1 zusammengestellt. Die vier Grafiken in Bild 1 zeigen die kontinuierliche Aufzeichnung der vertikalen Bewegung von Bug und Heck eines JUMBO bei Fahrt über eine ebene Sohle sowie bei Fahrt über Transportkörper der Länge von $\lambda = 50$ m, $\lambda = 100$ m und gemischter Sohlstruktur mit $\lambda = 50 - 75 - 100$ m. Ein Vergleich der Grafiken veranschaulicht die Zunahme des dynamischen Verhaltens in Abhängigkeit der Transportkörperlänge. Bei der Fahrt über die Transportkörperstrecke mit $\lambda = 50$ m zeigte das Schiff im Verhältnis zur ebenen Sohle ein nur leicht unruhigeres Fahrverhalten (Grafiken a und b).

Mit $\lambda = 100$ m war ein Verhältnis von TK-Länge λ zu Schiffslänge l von etwa $\lambda = l/3$ gewählt, sodass ein Stampfen des großen PPM-Containerschiffs mit der

Periode der Transportkörper angeregt wurde (Grafik c). Der Grund liegt in einem lokal höheren Bugsquat bei geringerer UKC über dem TK-Berg und gleichzeitigem geringeren Hecksquat bei lokal größerer Wassertiefe im TK-Tal. Die Amplituden erreichten in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit im Maximum Werte bis zu $\Delta S = 0,16$ m ($v_s = 15,3$ Kn). Die systematischen Untersuchungen mit TK-Feldern jeweils gleicher TK-Länge wurden ergänzt durch Fahrten über eine TK-Sohle mit unregelmäßigen Längen von $\lambda = 50$ m - 75 m - 100 m (ca. 5 Schiffslängen, 25 TK). Ein leichtes Stampfen des JUMBO infolge der unregelmäßigen TK-Abfolge wurde in einer Größenordnung von etwa $\Delta S = 0,07$ m ($v_s = 16,8$ Kn) registriert. Der Absolutwert des Squats wurde über einer unregelmäßigen TK-Strecke gleichermaßen reduziert wie bei den Versuchen mit konstanter TK-Länge (MEGA-JUMBO; Bild 2). Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abnahme des Squats bei der Fahrt über eine TK-Strecke, was sich besonders klar bei einer Kieflfreiheit von $UKC_R = 2$ m mit einer Größenordnung bis zu $\Delta S = 0,3$ m ($v_s \approx 13$ Kn) ergab.

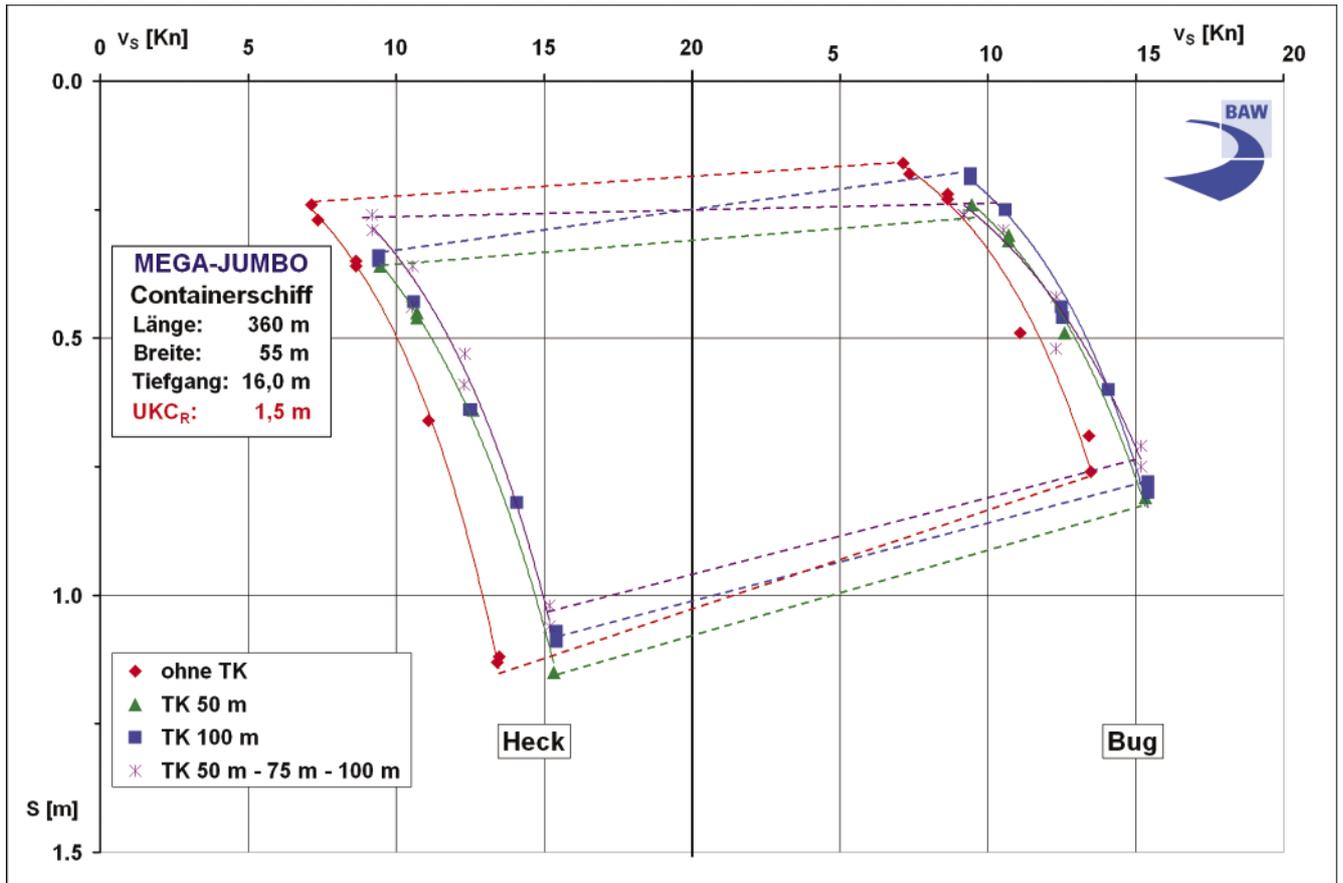


Bild 2: Einfluss der Sohlformen auf Squat und Trimm großer PPM-Containerschiffe (MEGA-JUMBO bei $UKC_R = 1,5 \text{ m}$; seitlich unbegrenztes Fahrwasser)

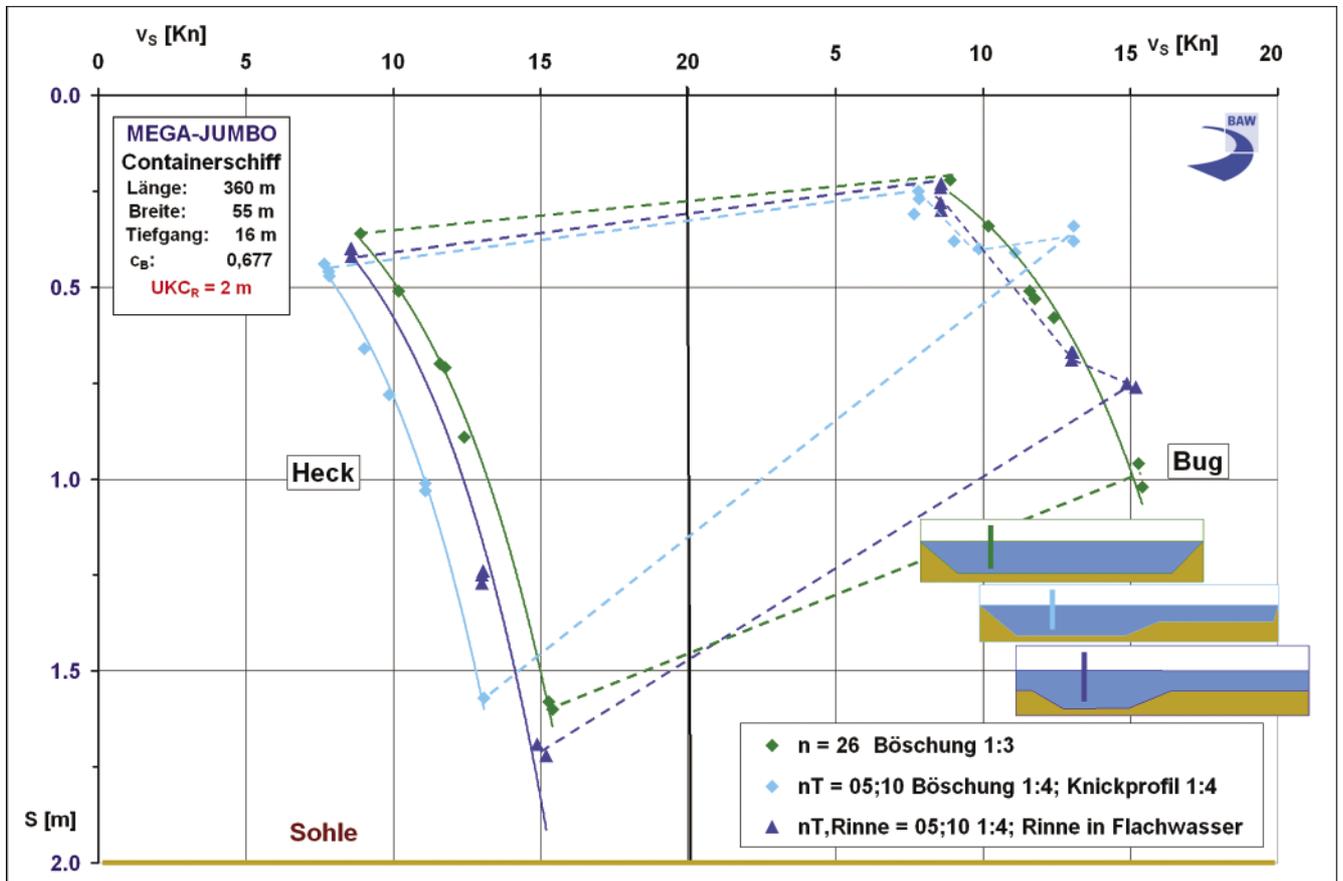


Bild 3: Squat und Trimm des MEGA-JUMBO in Abhängigkeit des Querschnittsverhältnisses, der Querprofilform und der Schiffsgeschwindigkeit

Fahrt in seitlich begrenztem Flachwasser

Aus der Vielfalt der Untersuchungsserien (u. a. Trapezprofil mittige / außermittige Fahrt; Trapez / Knickprofil; Rinne im Flachwasser) des Teilprojekts III werden in Bild 3 die Ergebnisse für die Passagen des MEGA-JUMBO

- 1.) bei außermittiger Fahrten durch ein breites Trapezprofil ($n = 26$; grün),
- 2.) bei Fahrt durch ein sehr enges Querprofil mit Teilquerschnittsverhältnissen von $n_T = 5 / 10$ ($n \approx 7$; hellblau) und
- 3.) bei Fahrt durch eine Rinne im Flachwasser ($n_{T,RINNE} \approx 5 / 10$; dunkelblau) vorgestellt.

Die jeweilige hydraulisch wirksame Querprofilbreite bestimmt zum einen deutlich den maximalen Squat des MEGA-JUMBO. Die Differenz von 1.) zu 2.) beträgt bei etwa $v_s \approx 12$ Kn annähernd $\Delta S \approx 0,7$ m. Zum anderen wird am Verlauf des Bugsquats ersichtlich, dass im engsten Querprofil ab etwa $v_s \approx 10$ Kn und bei Fahrt durch die Rinne im Flachwasser bei $v_s \approx 13$ Kn der Bereich der Grenzgeschwindigkeit erreicht wird. Der Gesamtwiderstand der extrem flachen und eng begrenzten Fahrrinne bewirkt, dass sich das Schiff stark hecklastig vertrimmt und der Bug sich auf die eigene Bugwelle schiebt. Der JUMBO verändert bei gleichen Randbedingungen in Abhängigkeit der Querschnittsverhältnisse den vorlichen Trimm in engen Querschnitten ($n_T = 7 / 14$) zum annähernd ausgeglichenen Trimm.

Vergleich mit bisherigen Berechnungsansätzen

Zur Überprüfung der Gültigkeit bekannter analytischer und empirischer Berechnungsansätze zum Squat wurden die Messergebnisse der Versuchsserien zusammen mit ausgewählten Berechnungen aufgetragen (Bild 4). Anhand der beispielhaften Auftragungen für Fahrten über Transportkörperstrecken (Bild 4a) bzw. bei Fahrt durch einen engen strukturierten Querschnitt (Bild 4b) wird deutlich, dass keiner der Berechnungsansätze die unterschiedlichen Reviervhältnisse all-gemeingültig berücksichtigt.

Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse der Grundsatzuntersuchungen zeigen, dass die bisher verwendeten Berechnungsformeln für extrem große Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen nicht zutreffend sind, da u. a. Sohlstrukturen in diesen Ansätzen nicht berücksichtigt werden. Bemerkenswert sind die deutlich geringeren Squatwerte bei Fahrt über Transportkörperstrecken in seitlich unbegrenztem Flachwasser, sodass für die vorhandenen Fahrrinnen bei entsprechenden Sohlstrukturen hinreichende nautische Sicherheiten anzuneh-

men sind. Für extrem große Containerschiffe werden in engen Querschnitten Grenzbereiche mit sehr hohen Squatwerten schon bei moderater Schiffsgeschwindigkeit (z. B. $v_s \approx 13$ Kn) erreicht. Auch das unterschiedliche Trimmverhalten (JUMBO mit $b = 40$ m zu MEGA-JUMBO mit $b = 55$ m) war bisher nicht bekannt.

Sind für die Reviere der Seeschiffahrtsstraßen exakte Angaben zu Squat und Trimm (Bug- bzw. Heck-squat) erforderlich, sind die bisher eingesetzten Berechnungsansätze als nicht hinreichend zu werten. Die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen verdeutlichen die Notwendigkeit, besondere lokale Gegebenheiten, wie u. a. Sohlstruktur, bei Simulationsversuchen zur Prognose der Fahrdynamik extrem großer Containerschiffe zu berücksichtigen.

Literatur

Dobert, J.: Neue Auftrags-Superwelle rollt an, HANSA, 140. Jhrg., Nr. 6, 2003

Flügge, G.; Uliczka, K.: Dynamisches Fahrverhalten und Wechselwirkungen mit der Fahrrinnensohle von sehr großen Containerschiffen unter extremen Flachwasserbedingungen, Tagungsband HTG-Kongress Häfen & Wasserstraßen, Hamburg, 2001

Flügge, G.; Uliczka, K.: Fahrverhalten großer Containerschiffe in extrem flachem Wasser, HANSA, 138. Jhrg., Nr. 12, 2001b

ICORELS: International Commission for the Reception of Large Ships, ICORELS Expression in: Seehafenzufahrten – Ein Leitfaden zur Bemessung (Übersetzung) PIANC/IAPH AG II-30, Bulletin Nr. 95, Bonn 1997

Uliczka, K.; Flügge, G.: Squat-Untersuchungen für sehr große Postpanmax-Containerschiffe, HTG/STG-Sprechtage, BAW Hamburg, März 2001

Uliczka, K.: Verkehrswasserbau an Seeschiffahrtsstraßen, 23. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik / Meerestechnik: Das Schiff in Wechselwirkung mit der Wasserstraße, Duisburg 2002

Conti: Taiwaner chartern Großschiffe, Hamburger Abendblatt, 26.08.2003

Wachstum bei Containerschiffen? HANSA, 140. Jhrg., Nr. 8, 2003

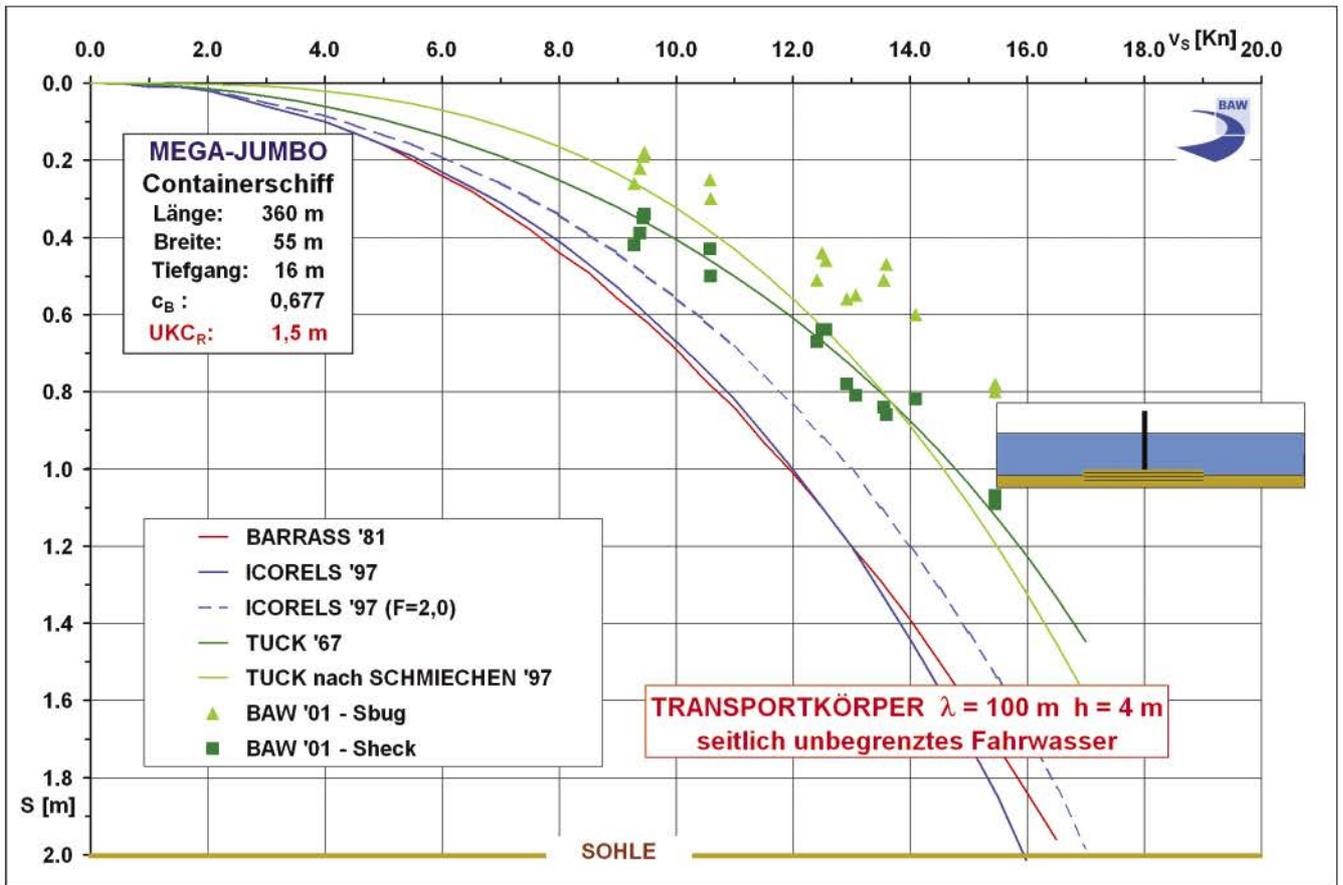


Bild 4a

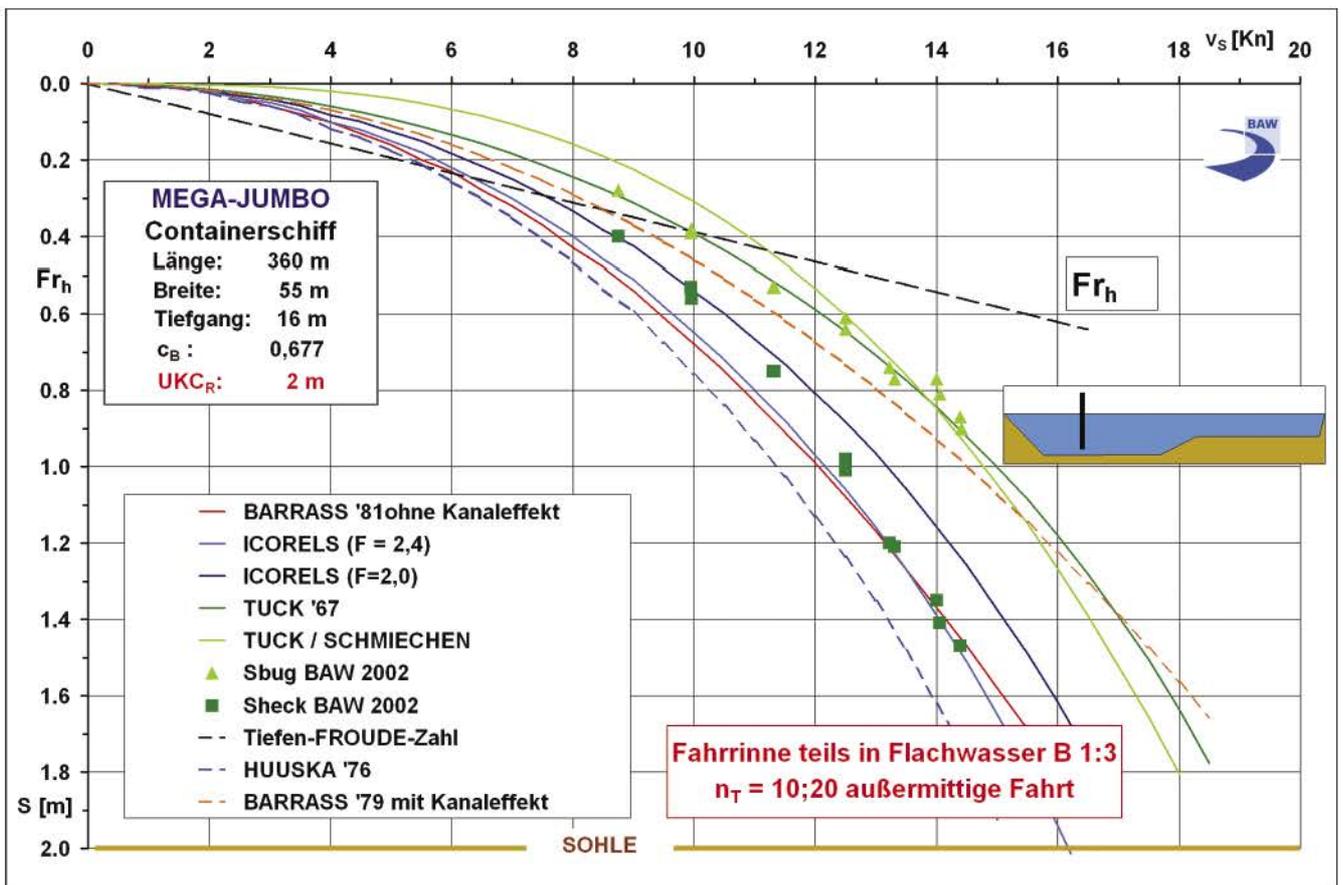


Bild 4b

Bild 4: Vergleich analytischer und empirischer Ansätze zum Squat mit Ergebnissen aus dem hydraulischen Modell (MEGA-JUMBO; Bild 4a: TK-Länge 100m; Bild 4b: seitlich begrenztes extremes Flachwasser)