

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Tenzer, Matthias; Mucha, Philipp; Lantermann, Udo

Aspekte der dynamischen Stabilität von Binnenschiffen bei Manövriervorgängen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101961>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Tenzer, Matthias; Mucha, Philipp; Lantermann, Udo (2013): Aspekte der dynamischen Stabilität von Binnenschiffen bei Manövriervorgängen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Havarie des TMS Waldhof - Bergung, Analysen, Einsichten. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 81-89.

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.



Aspekte der dynamischen Stabilität von Binnenschiffen bei Manövrier- vorgängen

Dipl.-Ing. Matthias Tenzer, M. Sc. Philipp Mucha, Dr.-Ing. Udo Lantermann,
Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme

1. Einleitung

Diese Arbeit zeigt beispielhaft den Einsatz von numerischen Methoden zur Erfassung des Einflusses von Drifffahrt, Schiff-Ufer Interaktionen und der Bewegung flüssiger Ladung mit freier Oberfläche auf die Fahrdynamik von Binnenschiffen. Auf Basis von systematischen numerischen Untersuchungen zur Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte und Momente, die bei den genannten Vorgängen auftreten, werden besondere Aspekte der dynamischen Stabilität diskutiert.

2. Numerische Methode

Numerische Strömungssimulationen im maritimen Kontext sind mittlerweile in Industrie und Forschung etabliert. Methoden, die auf der Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes (RANS) Gleichungen basieren, ermöglichen einen umfassenden Blick in das Strömungsfeld. Damit können diese Werkzeuge wertvolle Informationen über die dynamische Stabilität von Schiffen liefern, die zur Vorhersage oder zur Analyse von Schiffbewegungen genutzt werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurden das frei verfügbare Programmpaket OpenFOAM [1] und das kommerzielle Programmpaket STAR-CCM+ [2] eingesetzt. Eine Beschreibung der Strömung stellen die Navier-Stokes Gleichungen dar. Massen- und Impulserhaltung genügen der Formulierung:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \oint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_S \rho (\mathbf{v} \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} dS = \oint_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho \mathbf{b} dV \quad (2)$$

Hierbei ist \mathbf{v} der Geschwindigkeitsvektor, \mathbf{n} ist der Normalenvektor einer Kontrollvolumenoberfläche, \mathbf{T} der Spannungstensor und \mathbf{b} ein Vektor einer Kraft pro Einheitsmasse. Zur Berücksichtigung der Turbulenz werden die Strömungsgrößen durch einen jeweiligen zeitlichen Mittelwert und Schwankungsterm formuliert. Dies führt auf die RANS-Gleichungen. Turbulenzmodelle erweitern und schließen das entstehende Gleichungssystem. Die Erhaltungsgleichungen werden mit der Finite-Volumen Methode diskretisiert [3], bei der das Lösungsgebiet durch eine endliche Zahl von Kontrollvolumina (KV) beschrieben wird. Durch die Approximation der oben beschriebenen Gleichung in den jeweiligen KV entsteht schließlich ein algebraisches Gleichungssystem. Druck- und

Geschwindigkeitsfeld werden auf Basis des SIMPLE-Algorithmus gekoppelt [3]. Für instationäre Strömungen erfolgt die zeitliche Diskretisierung über ein implizites Dreizeitenenschema zweiter Ordnung. Die Starrkörperbewegungen des Schiffs werden durch Deformation des numerischen Gitters berücksichtigt [2]. Zur Beschreibung von Strömungen mit freier Oberfläche in den Tanks sowie um den Schiffsrumpf wird die Volume-of-Fluid Methode verwendet [2]. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [3].

3. Einfluss der Drifffahrt

Für die Untersuchung manövrierender Schiffe sind unter anderem die Einflüsse aus der Drifffahrt von Interesse. Dabei stehen die prinzipiellen Zusammenhänge der angreifenden hydrodynamischen Kräfte und der zugehörigen Hebelarme in Bezug auf die krängenden Momente im Vordergrund.

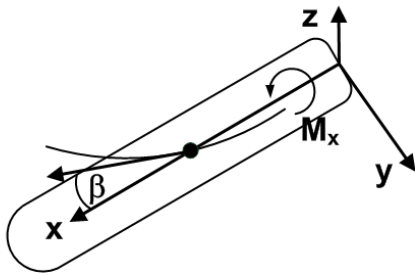


Bild 1: Koordinatensystem der numerischen Drifffahrtberechnungen

Der auf den Rumpf wirkende Momentenvektor \mathbf{M} lässt sich dabei in vektorieller Form als Kreuzprodukt des Hebelarms \mathbf{r} und der Kraft \mathbf{F} darstellen. Die Darstellung in Matrixschreibweise

$$\begin{pmatrix} 0 & F_z & -F_y \\ -F_z & 0 & F_x \\ F_y & -F_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

zeigt, dass die drei unbekannt Hebelarme allerdings nicht eindeutig bestimmt werden können. Bezüglich des Rollmomentes wird daher in der Praxis häufig folgende Vereinfachung vorgenommen:

$$F_z \cdot r_y - F_y \cdot r_z = M_x \approx -F_y \cdot r_z \quad (4)$$

Die Vernachlässigung des ersten Summanden beruht auf der Annahme, dass die Auftriebskräfte jederzeit entlang der Schiffslängsachse angreifen.

Mit der vorgestellten numerischen Methode wurden systematische stationäre Berechnungen der Kräfte und Momente an einem typischen Binnenschiff (siehe Tabelle 1) in Drifffahrt mit der

sogenannten Doppelrumpfmethode, d.h. unter Vernachlässigung der freien Wasseroberfläche, durchgeführt. Als Turbulenzmodell wurde das k-ε-Modell gewählt, für die Tiefwasserberechnungen wurde ein Rechengitter mit 800.000 Zellen und für die Flachwasserberechnungen ein Rechengitter mit 2 Mio. Zellen verwendet. Die Anteile der Momente aus der Vertikal- und Horizontalkraft lassen sich über die einzelnen Zellen i bis zur Gesamtanzahl n der Zellen am Schiffsrumpf aufsummieren. Die hydrodynamischen Kräfte enthalten dabei sowohl Reibungs- als auch Druckanteile:

$$F_z \cdot r_y = \sum_{i=1}^n F_{z_i} \cdot r_{y_i} ; \quad F_y \cdot r_z = \sum_{i=1}^n F_{y_i} \cdot r_{z_i} \quad (5)$$

Tabelle 1 enthält die zugrunde liegenden Schiffparameter und Umgebungsbedingungen. Durch zwei unterschiedliche Verhältnisse der Wassertiefe H zum Tiefgang T konnten Driftfahrten sowohl im tiefen als auch im flachen Wasser simuliert werden. L und B bezeichnen die Schiffslänge und Schiffsbreite, V_s die Schiffsgeschwindigkeit und β den Driftwinkel.

L [m]	B [m]	T [m]	H _{tief} [m]	H _{flach} [m]	V _s [km/h]	β [°]
110	10,5	3,12	200	5,6	3,6	0-45

Tabelle 1: Schiffparameter und Umgebungsbedingungen

Bild 1 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen. Aufgetragen ist jeweils das numerisch berechnete dimensionslose Gesamtmoment K' auf den Schiffskörper (schwarz) und die Anteile aus der Horizontalkraft (rot) und der Vertikalkraft (blau). Die dimensionslosen Momente werden dabei wie folgt gebildet:

$$K' = \frac{M_x}{0,5 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot L \cdot T^2} \quad (6)$$

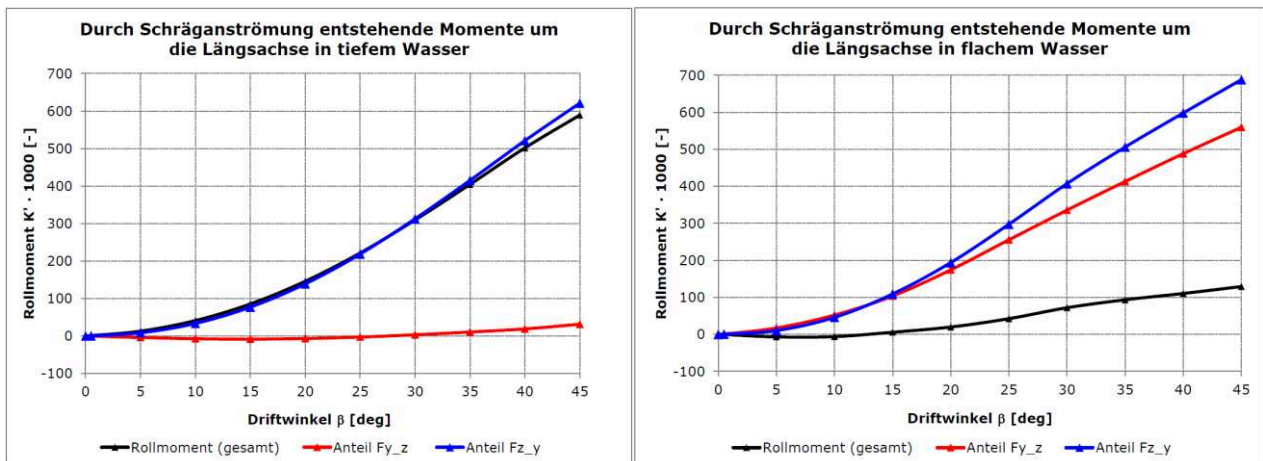


Bild 2: Vergleich der dimensionslosen Rollmomente und deren Anteile in tiefem Wasser (links) und flachem Wasser (rechts)

Es ist in beiden Fällen deutlich zu erkennen, dass dem Moment aus der Vertikalkraft eine entscheidende Bedeutung zukommt. Die Vernachlässigung der Vertikalkomponente ist demnach keine zulässige Vereinfachung. Das Rollmoment M_x wird im Gegenteil entscheidend durch die Vertikalkomponente bestimmt. Bild 3 zeigt die Druckverteilung am Schiffskörper für die Geradeausfahrt und 30° Driftwinkel. Die deutlich erkennbaren Bereiche geringeren Drucks an der Kimm bis hin zum Unterboden beeinflussen in entscheidender Weise das Rollmoment über die Vertikalkräfte.

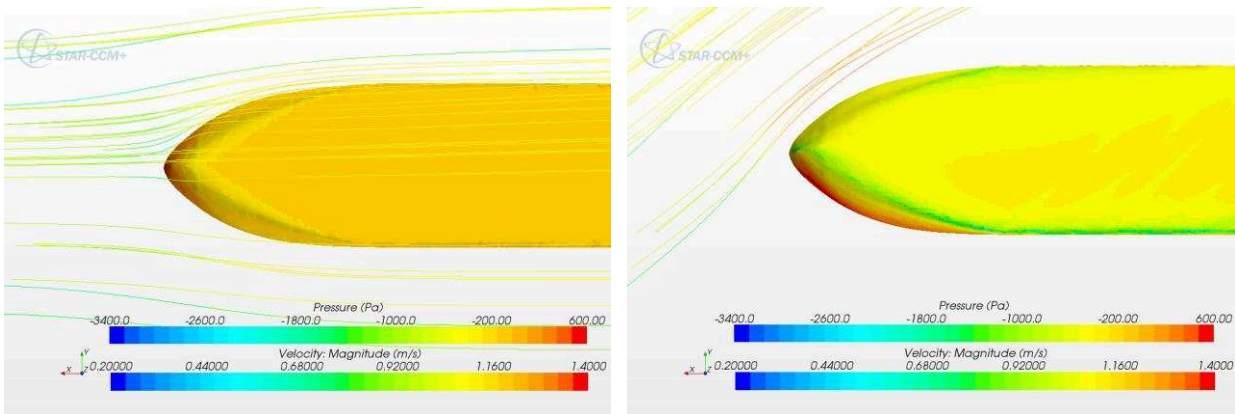


Bild 3: Vergleich der Druckverteilung am Schiffskörper bei Flachwasser zwischen Geradeausfahrt (links) und 30° Driftwinkel (rechts)

Weitere Untersuchungen, insbesondere im Hinblick auf gitterunabhängige Lösungen, werden derzeit durchgeführt. Die vorgestellten Ergebnisse können daher noch numerische Ungenauigkeiten beinhalten.

4. Einfluss von Schiff-Ufer Interaktionen

Die folgenden Ausführungen basieren auf der in [4] und [5] vorgestellten Arbeit. Der eingangs erwähnte Fortschritt numerischer Verfahren auf Basis der Lösung der RANS-Gleichungen erlaubt es, die im physikalischen Versuchswesen etablierte Technik der gefesselt geschleppten Modelle auf idealisierten Bahnverläufen – auch als PMM-Tests (*engl.* Planar Motion Mechanism Tests) bekannt - zu simulieren. Hierbei können sowohl vertikale als auch horizontale Gewässerbeschränkungen berücksichtigt werden. Aus diesen Tests können hydrodynamische Koeffizienten für die Bewegungsgleichungen eines manövrierenden Schiffs abgeleitet werden.

L [m]	B [m]	T [m]	∇ [m ³]
320	58	20,5	312622

Tabelle 2: Hauptabmessungen des Tankers KVLCC2

Durch die asymmetrische Umströmung eines zur Wand parallelen Schiffs entsteht wandseitig ein ausgeprägtes Feld niederen Drucks, das eine zur Wand gerichtete Querkraft und ein Gierrmoment

induziert, die sich destabilisierend auf die Dynamik des Schiffs auswirken. In der vorliegenden Untersuchung wird ein vereinfachtes Modell zur Beschreibung der Fahrt eines Tankers entlang einer vertikalen Wand unendlicher Tiefe verwendet, das die Bewegungen des Schiffs in der xy-Ebene (siehe Bild 4) beschreibt und zudem von einer Vorwärtsgeschwindigkeit ausgeht:

$$\begin{bmatrix} -Y_{\dot{v}} + \Delta & -Y_{\dot{r}} + \Delta x_g \\ -N_{\dot{v}} + \Delta x_g & -N_{\dot{r}} + I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_r + (\Delta - X_{\dot{u}})U_1 \\ -N_v + (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})U_1 & -N_r + (\Delta - Y_{\dot{r}})U_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{\delta_R} \\ -N_{\delta_R} \end{bmatrix} [\delta_R] \quad (7)$$

In Gleichung (7) ist Δ die Schiffsmasse, x_g die Längskoordinate des Gewichtsschwerpunkts, U_1 die konstante Schiffsgeschwindigkeit in Längsrichtung (hier 6 kn), v die Geschwindigkeit in Querrichtung und r die Giergeschwindigkeit bezogen auf das in Bild 4 dargestellte Koordinatensystem. Die Wand befindet sich in einem Abstand d auf der Steuerbordseite. Die mit den Indizes v , r und δ_R und deren zeitlichen Ableitungen versehenen Variablen (beschrieben durch einen Punkt über den Variablen) kennzeichnen die hydrodynamischen Koeffizienten, die durch Entwicklung der äußeren Kräfte und Momente in eine Taylor-Reihe entstehen. Koeffizienten mit einem Y stehen für Anteile der Querkraft und solche mit N für Anteile des Giermoments. Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung des obigen Modells ist [4] zu entnehmen. Für schiffsähnliche Körper ist die hydrodynamische Masse in Längsrichtung viel kleiner als die Schiffsmasse und sei demnach vernachlässigt.

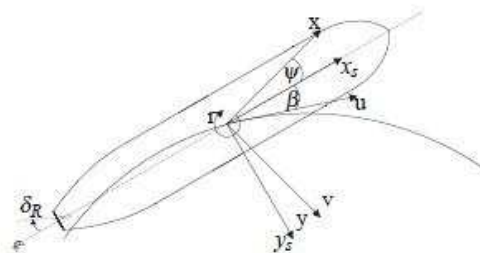


Bild 4: Koordinatensystem zur Beschreibung der Bewegungen des Schiffs

Für die Bestimmung der in (7) auftauchenden Koeffizienten sind drei verschiedene Typen von PMM-Tests notwendig. In sogenannten dynamischen Tests wird das Schiff mit einer Vorausschwindigkeit und Anregung der Querbewegung bei gleichzeitiger Sperrung der anderen Bewegungsformen auf einem idealisierten harmonischen Bahnverlauf durch den Versuchstank geschleppt. Der resultierende periodische Verlauf von Querkraft und Giermoment über der Zeit wird durch Fourier-Analyse in beschleunigungs- und geschwindigkeitsabhängige Anteile zerlegt. Deren Kenntnis erlaubt die Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten. Analog geht man für die reine Gierbewegung vor. In stationären Tests wird die Ruderstellung über verschiedene Winkel variiert und die gemessene Querkraft und das Giermoment über den Ruderwinkel aufgetragen. Die

Änderung dieser Zusammenhänge bei null Grad Ruderstellung liefert die Koeffizienten für Querkraft und -moment in Folge einer Ruderlegung wie sie in (7) Geltung finden. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik ist in [4] nachzulesen.

Zur Berechnung der dreidimensionalen viskosen Umströmung des Schiffs wird die kommerzielle Anwendung STARCCM+ [2] verwendet. Die Starrkörperbewegungen des Schiffs werden hier durch Deformation des numerischen Gitters berücksichtigt [2]. Bild 5 zeigt die dimensionslose Querkraft Y' und das dimensionslose Giermoment N' für verschiedene Ruderwinkel in Abhängigkeit von verschiedenen Abständen zur Wand. Der Verlauf von Y' offenbart zwei wesentliche Erkenntnisse. Zum einen wächst die Querkraft für einen Ruderwinkel $\delta_R = 0^\circ$ nichtlinear mit abnehmendem Wandabstand an. Zum anderen weist der Verlauf über den Bereich der betrachteten Ruderwinkel eine Asymmetrie bezüglich der Ordinate auf. Diese Erkenntnisse sind nicht auf N' übertragbar. Durch Änderung des Druckmittelpunkts ändert sich auch der Hebelarm des Moments, wodurch der Anstieg der das Moment verursachenden Querkraft ausgeglichen wird.

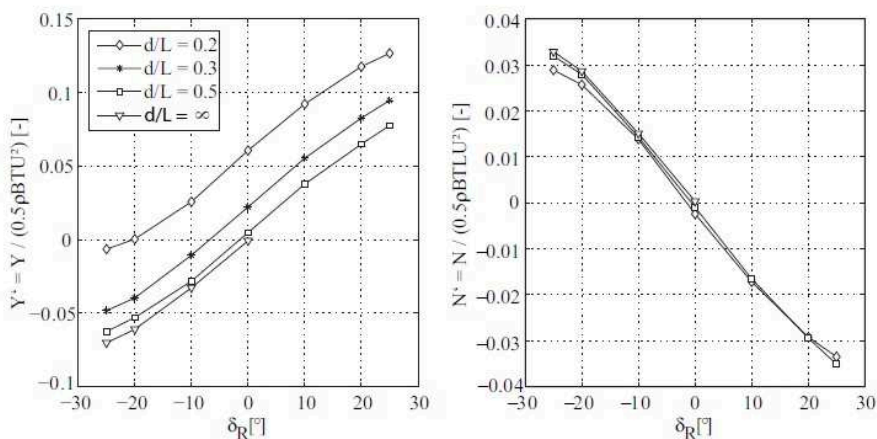


Bild 5: Dimensionslose Querkraft und dimensionsloses Giermoment in Abhängigkeit des Ruderwinkels und des Abstands zur Wand

Bild 6 zeigt das Verhältnis von hydrodynamischer Masse in Querrichtung zur Schiffsmasse in Abhängigkeit des dimensionslosen Abstands zur Wand. Die Größenordnung für den Fall der Fahrt in unbeschränktem Gewässer ist mit rund 0.85 typisch für den betrachteten Schiffstyp. Das Verhältnis nimmt mit kleiner werdendem Abstand zur Wand deutlich zu. Auch die anderen beschleunigungs- und die geschwindigkeitsabhängigen Koeffizienten folgen einer ähnlichen Abhängigkeit vom Wandabstand d [4]. Die so bestimmte Änderung der hydrodynamischen Koeffizienten hat zur Ursache, dass das durch die Schiff-Ufer-Interaktionskräfte gestörte Schiff an Trägheit zunimmt und Dämpfung verliert. In weiterführenden Untersuchungen wurde gezeigt, dass bei Führung des Schiffs durch einen Kursregler der Regelungsaufwand bei kleiner werdendem Wandabstand signifikant steigt [4].

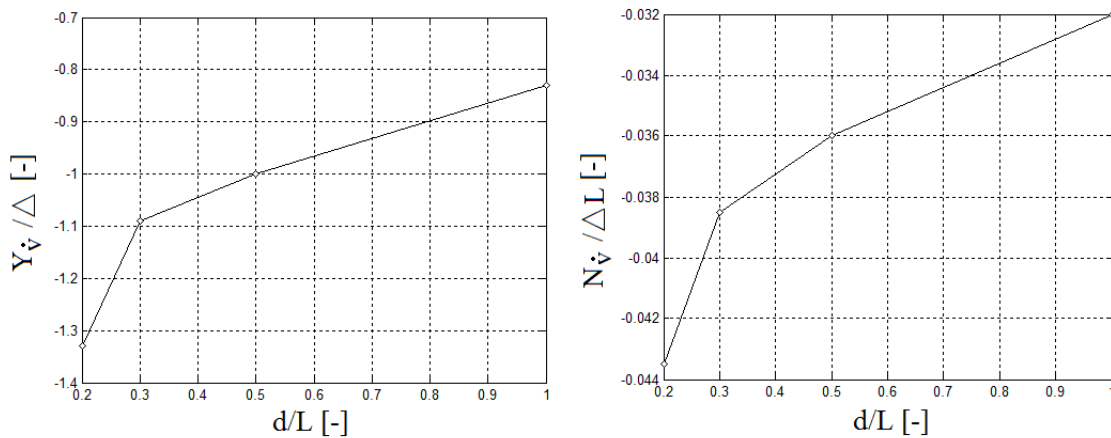


Bild 6: Dimensionslose hydrodynamische Koeffizienten $Y_{\dot{v}}$ und $N_{\dot{v}}$ in Abhängigkeit des dimensionslosen Wandabstands

5. Einfluss freier Oberflächen in Ladungstanks

Bei einer Teilfüllung der Ladetanks ergibt sich die Frage nach der Größenordnung der durch die Bewegung der Flüssigkeit in den Ladetanks induzierten Rollmomente. Dazu werden die Strömungen in den teilgefüllten Tanks berechnet. Die Hauptabmessungen des Schiffs sind in Tabelle 1 angegeben. In Bild 1 wird das schiffsfeste Koordinatensystem dargestellt. Die Schiffsbewegung in Form von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Schwerpunktes und des Gierwinkels ist vorgegeben worden. Die Wechselwirkungen zwischen der Bewegung des Fluids und derjenigen des Schiffs werden nicht berücksichtigt. Die Simulationen erfolgen für verschiedene Szenarien, die sich durch die Wahl eines vorgegebenen Krängungswinkels $\varphi=2.5^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$ und 10° unterscheiden.

Bild 7 zeigt den zeitlichen Verlauf der dynamischen Überhöhung des Rollmomentes infolge der Fluidbewegung während der letzten 150 s der vorgegebenen Bewegungsdaten. Die dynamische Erhöhung ergibt sich aus dem Verhältnis des gesamten durch die Flüssigkeit induzierten Rollmomentes zu dem statischen Rollmoment aufgrund der Krängung, $K_{FO}/K_{FO,stat}$. Mit abnehmendem Krängungswinkel zeigt sich eine Zunahme der dynamischen Überhöhung. Ursache hierfür ist das statische Rollmoment $K_{FO,stat}$, welches sich ebenfalls verringert.

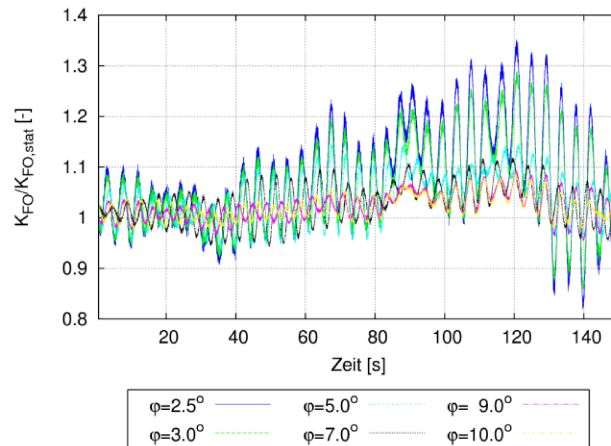


Bild 7: Zeitlicher Verlauf der dynamischen Überhöhung des Rollmomentes um die Schiffslängsachse bei verschiedenen Krängungswinkeln

Für das ungekrängte Schiff ist der Schwerpunkt der Flüssigkeit im schiffsfesten Koordinatensystem bestimmt worden. Der zeitliche Verlauf der Abweichung des Schwerpunktes der Flüssigkeit in Schiffsquerrichtung bezüglich der halben Schiffsbreite, $y^* = y / (B/2)$, ist auf Bild 8 dargestellt. Während der letzten 30 s der Aufzeichnung traten die maximalen Auslenkungen zur Ruhelage zwischen +7‰ und -1‰ bezogen auf die halbe Schiffsbreite auf.

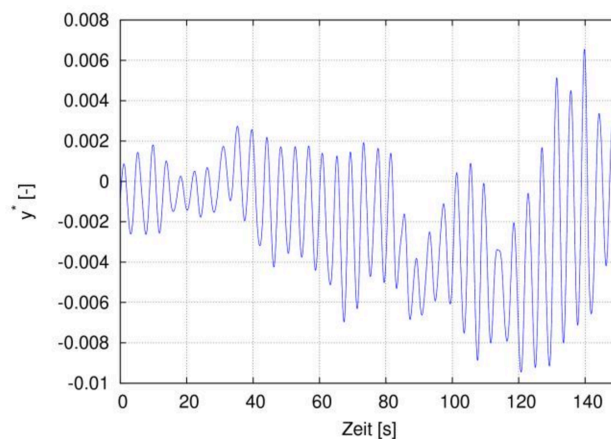


Bild 8: Zeitlicher Verlauf der Abweichung des Schwerpunktes der Flüssigkeit in Querrichtung bezüglich der halben Schiffsbreite B/2

6. Zusammenfassung

Der Einfluss von Driftfahrt, Schiff-Ufer-Interaktionen und der freier Oberflächen in Ladetanks auf die Bewegungen eines Schiffs wurden numerisch untersucht. Der in einer Driftfahrt entstehende Anteil des durch die Vertikalkraft hervorgerufenen Rollmomentes ist für das untersuchte typische Binnenschiff in flachem Gewässer erheblich und sollte demnach bei der Vorhersage der Schiffbewegungen berücksichtigt werden. Die Interaktionen zwischen einem großen Tanker und einer vertikalen Wand unendlicher Tiefe und deren Einfluss auf die hydrodynamischen Eigenschaften wurden aufgezeigt. Die Änderung der Trägheits- und Dämpfungseigenschaften sind starke

Funktionen des Wandabstands und von destabilisierender Wirkung für die Quer- und Gierbewegungen. Die numerischen Untersuchungen der durch die Bewegung der Flüssigkeit in den Ladungstanks induzierten Rollmomente ergaben eine starke Abhängigkeit von dem vorgegebenen Krängungswinkel. Je kleiner der Krängungswinkel gewählt wurde, desto größer war der Einfluss der dynamischen Überhöhung.

7. Literatur

- [1] OpenCFD Ltd.: OpenFoam UserGuide, <http://www.openfoam.com>
- [2] CD-adapco: Star-ccm+ UserGuide, Version 6.04.014
- [3] Ferziger, J. H., Peric, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlin Heidelberg, 2010
- [4] Mucha, P.: Schiff-Ufer Interaktionen und verbundene regelungstechnische Fragestellungen, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), erscheint in 2013
- [5] Mucha, P., el Moctar, O.: Ship-Bank Interactions of a Large Tanker and Related Control Problems, zur OMAE2013 akzeptiert