

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

## El Moctar, Bettar Ould; Lantermann, Udo; Mucha, Philipp Numerische Methoden zum Manövrierverhalten von Schiffen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102313>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

El Moctar, Bettar Ould; Lantermann, Udo; Mucha, Philipp (2015): Numerische Methoden zum Manövrierverhalten von Schiffen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 93-100.

### 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.



## Numerische Methoden zum Manövrierverhalten von Schiffen

Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould el Moctar, ISMT, Universität Duisburg-Essen

Dr.-Ing. Udo Lantermann, ISMT, Universität Duisburg-Essen

Philipp Mucha, ISMT, Universität Duisburg-Essen

### Einleitung

Durch Kollisionen und Strandungen von Schiffen kommen bis heute Menschen, Schiffe, ihre Ladung und die Umwelt zu Schaden. *Bild 1* belegt, dass seit 1995 die Kollisionen zunehmen und einen erheblichen Anteil (fast 25%) an den Gesamtschäden ausmachen. Diese Tendenz geht einher mit einem Wachstum der Handelsflotte (*Bild 2*) und der damit höheren Verkehrsdichte. Es ist davon auszugehen, dass ein weiteres Wachstum der Welthandelsflotte zukünftig zu einem Anstieg des Kollisionsrisikos führen wird. Die Annahme liegt nahe, dass Kollisionen und Strandungen außerdem umso häufiger auftreten, je schlechter ein Schiff manövrieren kann. Wie gut und wie schlecht ein Neubau manövriert, stellt man dann auf der Probefahrt oder später im Betrieb fest. Änderungen sind nur noch mit hohen Kosten möglich. Die IMO hat 2002 Standards bezüglich des Manövrierverhaltens von Schiffen herausgegeben (IMO, 2002). Diese Empfehlungen sind heute bei den meisten Neubauten im Bauvertrag enthalten, weil einige Staaten deren Einhaltung für das Einlaufen von Schiffen in Ihre Gewässer fordern. Es kann festgestellt werden, dass für die Verwirklichung von Sicherheitsmaßnahmen die Kenntnis des Manövrierverhaltens im alltäglichen Schiffsbetrieb und in Notsituationen Voraussetzung ist. D.h., es muss möglich sein, für ein bestimmtes Schiff beliebige Manöver im Entwurfsstadium vorzuberechnen. Durch begrenztes Fahrwasser, Strömung und häufige Begegnungen mit anderen Schiffen kommt der Vorhersage der Manövrierfähigkeit in der Binnenschifffahrt eine große Bedeutung zu. Auch hier ist ein Zuwachs des Verkehrs prognostiziert. Für die wichtige Rheinschifffahrt steht die Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV, 1994) als regulativer Rahmen für die Leistungsfähigkeit in Bezug auf das Manövrieren. Zur Vorhersage des Manövrierens werden mathematische Modelle verwendet. Durch die vermehrte Anwendung von Schiffführungssimulatoren für Befahrbarkeitsanalysen im Verkehrswasserbau besteht Notwendigkeit zur Studie mathematischer Modelle für die Vorhersage des Manövrierens.

### Mathematische Modelle

Die heute für Manövriersimulationen eingesetzten mathematischen Simulationsmodelle lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen einteilen: Zum einen sind es die sogenannten Regressionsmodelle, in denen die Kräfte und Momente am Schiff durch modifizierte Taylor-Reihen für die kinematischen und geometrischen Größen approximiert werden. Zum anderen sind es die modularen Simulationsalgorithmen, in denen die Kräfte am Rumpf und an den Anhängen sowie weitere äußere Einwirkungen als separate Module betrachtet werden. Zu den modularen Simulationsalgorithmen gehören die in der Praxis weit verbreiteten Berechnungsverfahren von Söding (1982) und von Sharma (das 4-Quadrantenmodell) (1982).

Schließlich ist man heute in der Lage, Standardmanöver durch Lösen der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen und deren Kopplung mit den nichtlinearen Bewegungsgleichungen starrer Körper zu simulieren. Die Bewegungsgleichungen basierend auf klassischer Newton' scher Mechanik für ein als Starrkörper angenommenes Schiff konstanter Masse werden im Folgenden vereinfacht in den Bewegungsformen der horizontalen Ebene - Vorschneilen, Driften und Gieren – formuliert und diskutiert. Die Zusammenhänge sind für ein schiffsfestes kartesisches Koordinatensystem gültig (Bild 3):

$$m(\dot{u} - vr - x_g r^2) = X \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + ur + x_g \dot{r}) = Y \quad (2)$$

$$I_z \dot{r} + m x_g (\dot{v} + ur) = N \quad (3)$$

In (1-3) beschreibt  $x_g$  die Längskoordinate des Massenschwerpunkts im schiffsfesten Referenzsystem,  $I_z$  ist das Massenträgheitsmoment um die vertikale Achse,  $u$  ist die Schiffsgeschwindigkeit in Längsrichtung,  $v$  in Querrichtung und  $r$  ist die Giergeschwindigkeit. Zeitliche Ableitungen sind über der relevanten Größe punktiert. Die Schiffsmasse ist  $m$ ,  $X$  ist die hydrodynamische Kraft in Längsrichtung,  $Y$  in Querrichtung und  $N$  das hydrodynamische Moment um die vertikale Achse. Ableitbare Ergebnisse der Lösung von (1-3) sind die zeitlichen Entwicklungen der Schiffposition in Bezug auf ein erdfestes Referenzsystem, die Schiffsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen. Die hydrodynamischen Kräfte und Momente sind unbekannt. Sie seien hier für die folgende Diskussion in Vektornotation  $\mathbf{F}=[X, Y, N]^T$  zusammengefasst. Eine Theorie, die alle bekannten strömungsmechanischen Phänomene in Bezug auf die Kraftwirkungen manövrierender Schiffe umfasst, und die die Herleitung einer zeit- ökonomischen Lösungsmethode ermöglicht, ist nicht bekannt. Die Komplexität dieser Aufgabe bezieht sich vor allem auf die Beschreibung der durch das manövrierende Schiff hervorgerufenen Störungen der freien Wasseroberfläche und Vortizität. Im begrenzten Fahrwasser verstärken sich o.g. Effekte sogar noch, und mit ihnen die Schwierigkeit der Formulierung mathematischer Modelle. Das vom Standpunkt der Strömungsmechanik umfassendste Modell zur transienten Bestimmung von  $\mathbf{F}$  basiert auf der numerischen Lösung der Navier-Stokes Gleichungen mit noch anzunehmenden Vereinfachungen für die Turbulenzmodellierung. Am weitesten verbreitet sind Methoden, die auf der Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen basieren. Die Klasse der Regressionsmodelle beschreibt die schiffsspezifischen hydrodynamischen Eigenschaften durch Koeffizienten – hierzu zählen hydrodynamische Massen- und Trägheitswirkung und Dämpfungswirkungen verschiedener Ordnung. Eine mathematische Repräsentation dieses Ansatzes kann durch Formulierung modifizierter Taylor-Reihen gefunden werden.

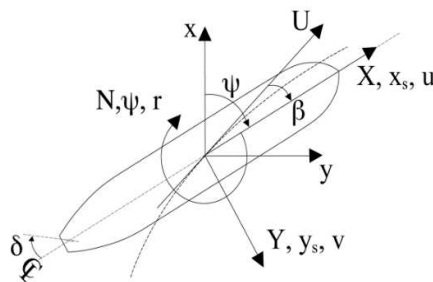


Bild 1: Koordinatensystem und Definition der Kräfte und Winkel

Die erste konsequente Anwendung geht auf Abkowitz (1964) zurück. Diese Modelle basieren auf einer integralen Auswertung der Kraftwirkungen des Gesamtsystems und haben den Vorteil, die Interaktionen zwischen Rumpf, Ruder und Propeller per se schon zu enthalten. Die Koeffizienten werden in systematischen gefesselten Modellversuchen (virtuell auf Basis der Lösung der RANS-Gleichungen oder experimentell) über die gemessenen oder berechneten Kraftverläufe bestimmt, ITTC (2011). Sie können auch mit Hilfe geeigneter Systemidentifikationsalgorithmen auf Basis gemessener Zustandsgrößen aus freifahrenden Modellversuchen oder Großausführungsmessungen gewonnen werden. Ein typisches Modell zur Vorhersage von Standardrudermanövern in tiefem Wasser wurde von Mucha und el Moctar (2015) auf Basis von hydrodynamischen Überlegungen und Sensitivitätsstudien eines veröffentlichten Modells von Wolff (1981) hergeleitet:

$$X = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr + X_{\delta\delta}\delta^2 \quad (4)$$

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_vv + Y_{vvv}v^3 + Y_r r + Y_{rrr}r^3 + Y_{vvr}vvr + Y_{rvv}rvv + Y_{\delta}\delta + Y_{\delta\delta\delta}\delta^3 + Y_{\delta\Delta u}\delta\Delta u \quad (5)$$

$$N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_vv + N_{vvv}v^3 + N_r r + N_{rrr}r^3 + N_{vvr}vvr + N_{rvv}rvv + N_{\delta}\delta + N_{\delta\delta\delta}\delta^3 + N_{\delta\Delta u}\delta\Delta u \quad (6)$$

Die Klasse der modularen Modelle basiert auf der allgemeinen Unterteilung nach Kraftwirkungen durch den Rumpf und solche durch die Manövrierorgane (R: Ruder, P: Propeller, H: Rumpf im Wasser, W: Wind), z.B. für eine verallgemeinerte Kraftkomponente  $F$ :

$$F = F_H + F_R + F_P + F_W \quad (7)$$

Die Berechnung der einzelnen Komponenten wird getrennt durchgeführt, wobei die Wechselwirkung z.B. zwischen Rumpf und Anhänge berücksichtigt wird.

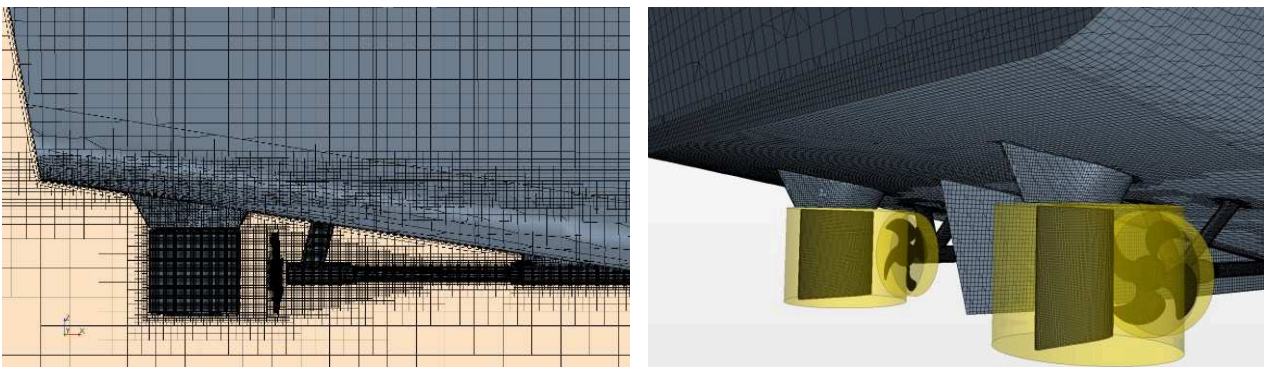
Eine weitere Unterteilung kann nach physikalischen Kraftwirkungsprinzipien erfolgen. Hiernach kann zum Beispiel nach Kraftwirkungen unterschieden werden, die in einer idealen Flüssigkeit auftreten, nach solchen, die durch klassische Tragflügeltheorie erklärt werden können und nach Querströmungswiderstandsanteilen. Auch die Theorie schlanker Körper bietet Approximationen zur Beschreibung der Kräfte an manövrierenden Schiffen. Für das Modul der Rumpfkraften kann z.B. aber auch ein modifizierter Taylor-Reihen Ansatz mit Koeffizienten verwendet werden. Modulare Modelle sind bei Variationsstudien vorteilhaft, bei denen nur ein Bestandteil des Gesamtsystems (z.B. das Ruder) verändert wird. Zudem lassen sich größere Gültigkeitsbereiche der Betriebszustände gegenüber den Regressionsmodellen modellieren, die häufig nur rund um einen gegebenen Manöveranfahrtszustand gültig sind, wie es die Simulation von Standardmanövern erfordert. Modulare Modelle werden u.a. von Söding (1982) und Sharma (1982) diskutiert.

Bei einer direkten Simulation der Schiffsbewegungen werden die Newton'schen Bewegungsgleichungen mit den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) implizit gekoppelt, el Moctar et al. (2014). Die zur Lösung der Starrkörper-Bewegungsgleichungen notwendigen Kräfte und Momente am Rumpf und Anhänge werden mehrfach (mehrere äußere Iterationen) in jedem Zeitschritt berechnet.

Gegenüber einer direkten Simulation basierend auf der Lösung der RANS-Gleichungen zeichnen sich Regressionsmodelle und modulare Modelle durch Ihre Schnelligkeit aus, da nur ein gekoppeltes nichtlineares DGL-System gelöst werden muss, welches mit herkömmlichen Desktop-Computern in Bruchteilen von Sekunden geschieht. Die Modelle eignen sich daher für echtzeitfähige Simulatoren.

### Direkte Manövervorhersage auf Basis der RANS-Gleichungen

Zur Veranschaulichung der Leistungsfähigkeit und Verlässlichkeit der direkten Berechnungen wird eine Studie zur Vorhersage von Standardmanövern mit einem Dockschiff ( $L=95\text{m}$ ,  $B=19,6\text{m}$ ,  $T_m=3,77\text{m}$ ,  $C_B=0,76$ ) vorgestellt, die ausführlich in el Moctar et al. (2014) beschrieben ist. Für das Schiff und den numerischen Tank wurde ein unstrukturiertes Gitter von ca. 3 Millionen Kontrollvolumina erstellt (*Bild 2*). Die RANS-Gleichungen wurden mit der Finite Volumen-Methode diskretisiert. Zudem wurde das Zweigleichungs-Turbulenzmodell  $k\epsilon$ -RNG mit Wandfunktionen am Schiffsrumpf und Anhänge verwendet. Die freie Wasseroberfläche wurde mit der Volume of Fluid Methode (VoF) berechnet. Die zeitliche Diskretisierung folgte einem Dreizeitebenen-Verfahren zweiter Ordnung. Die globalen Bewegungen des Schiffes wurden durch Translation und Rotation des gesamten Lösungsgebiets realisiert. Die Drehung von Propeller und Ruder wurde mit Hilfe der Technik der gleitenden Gitter (sliding interface technique, SI) modelliert. Die Berechnungen wurden parallel in 24 Prozessen durchgeführt. Bei der SI-Methode, bei der sich das Berechnungsgitter um den Propeller um  $3^\circ$  pro Zeitschritt dreht betrug die Berechnungszeit für 70s Simulation 45 Tage. Die berechneten und gemessenen (HSVA und Germanischer Lloyd) Schiffsbewegungen beim 10/10 Z-Manöver (*Bild 3*) und Drehkreismanöver (*Bild 4*) stimmen gut überein.



*Bild 2: Berechnungsgitters am Heck des Schiffs*

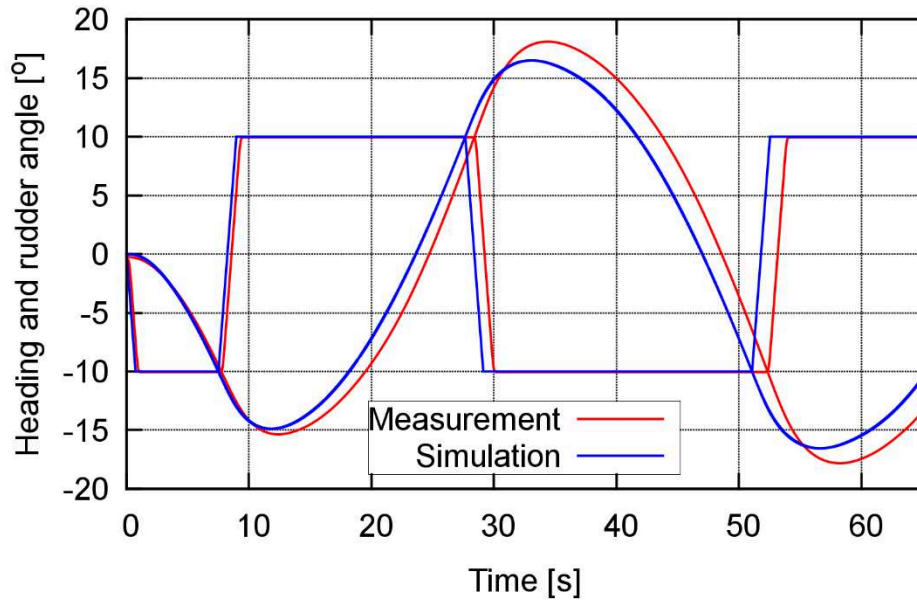


Bild 3: Direkt-berechnete und gemessene Gierwinkel bei einem 10/10-Z-Manöver eines Dockschiffs (Modellmaßstab)

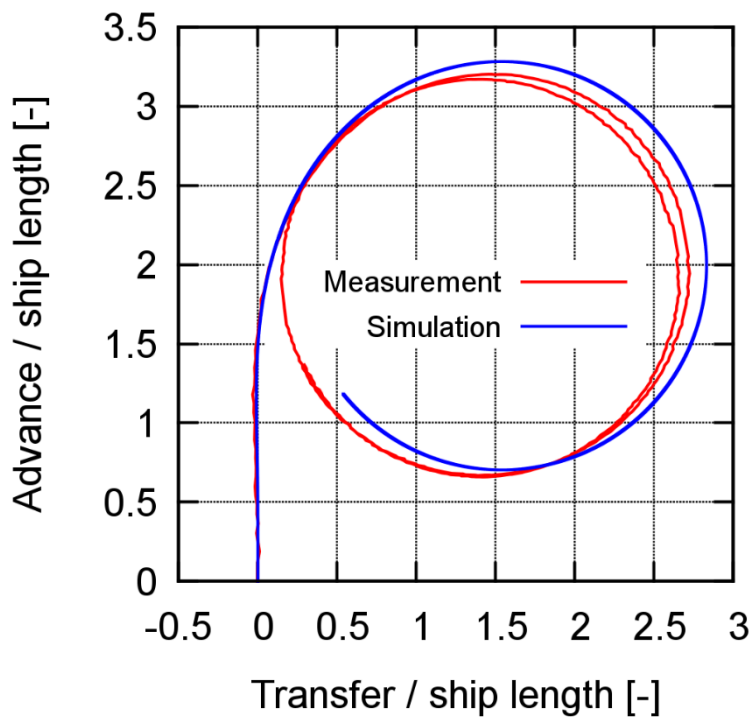


Bild 4: Direkt-berechnete und gemessene Drehkreis-Bewegung eines Dockschiffs (Großausführung)

### Manövrierprognose mit Regressionsmodellen auf Basis virtueller gefesselter Versuche

Mit Hilfe von virtuellen gefesselten Manövrierversuchen wurde für das Tankschiff KVLCC2 ( $L=320\text{m}$ ,  $B=58\text{m}$ ,  $T=20,8$ ,  $C_B=0.81$ ) ein vollständiger Satz von Koeffizienten für das Modell (4-6) ermittelt. Für die Anfahrsgeschwindigkeit von  $15,5\text{ kn}$  können beliebige Rudermanöver in kürzester Zeit simuliert werden. Bild 5 zeigt den Vergleich der Drehkreise aus Simulation und Modellversuchen von MARIN (beide durchgeführt im Modellmaßstab und extrapoliert auf die Großausführung), Quadvlieg und Brouwers (2011). Die Übereinstimmung ist zufriedenstellend. Der taktische Durchmesser ist von der Simulation um ca. 10% überschätzt, der stationäre Drehkreisradius ebenso. Bild 6 zeigt den Vergleich von Experiment und Simulation für ein 10/10 Z-Manöver. Die Prognosen für den ersten und zweiten Überschwingwinkel liegen nahe beieinander. Für eine ausführliche Validierung sind Wiederholbarkeitsstudien des Modellversuchs und der Vergleich der Zustandsgrößen über der Zeit heranzuziehen. Hier zeigen sich bei dem Drehkreis Abweichungen in der Drehgeschwindigkeit (ca. 15%) und dem Geschwindigkeitsabfall gegenüber der Anfahrsgeschwindigkeit (ca. 10%), die als Erklärung für die Abweichung dienen können. Der Konfidenzintervall 95% für den taktischen Durchmesser wurde zu  $30\text{m}$  ermittelt, welches ca. 9% der Schiffslänge entspricht. Für den Überschwingwinkel in den Z-Manövern liegt er bei  $1^\circ$ . Für die Beurteilung der Manövrierfähigkeit im Entwurfsstadium sind die Regressionsmodelle eine effektive Möglichkeit. Die Methode kann mit geeigneten Modellanpassungen auf Flachwasser erweitert werden.

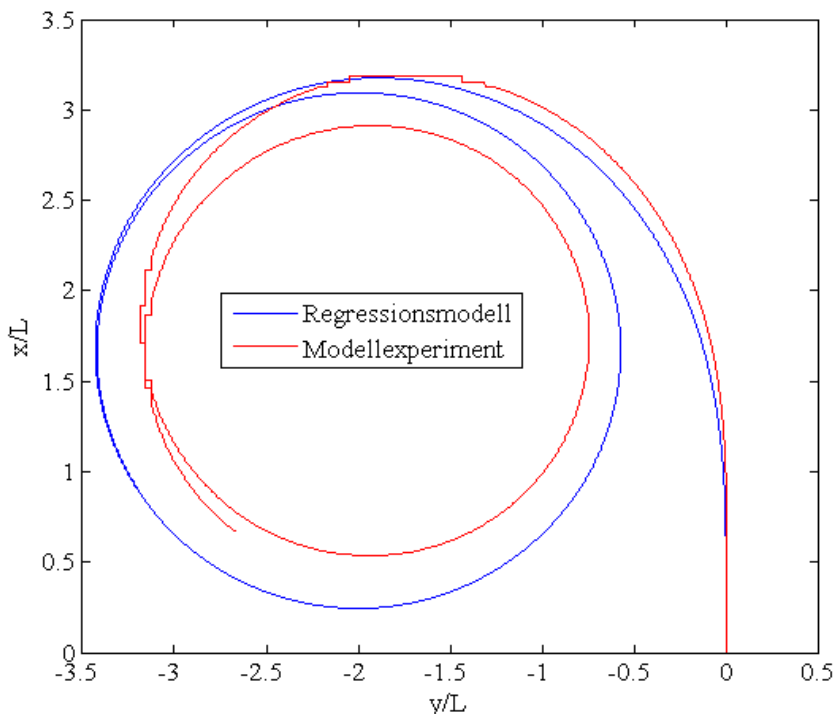


Bild 5: Direkt-berechnete und gemessene Drehkreis-Bewegung eines Tankers (Modellmaßstab): Regressionsmodell auf Basis virtueller gefesselter Versuche

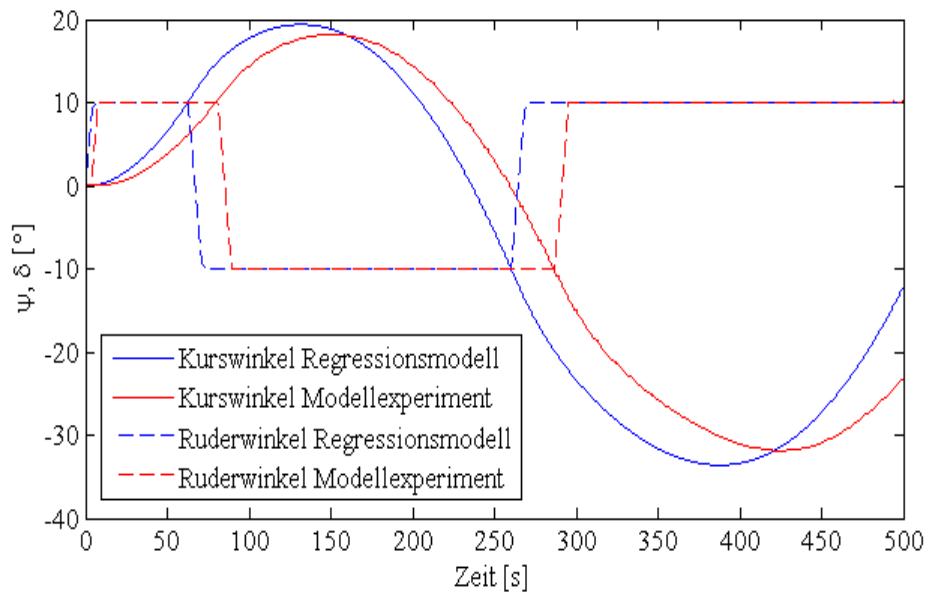


Bild 6: Berechnete und gemessene Gierwinkel bei einem 10/10-Z-Manöver eines Tankers (Modellmaßstab): Regressionsmodell auf Basis virtueller gefesselter Versuche

## Literatur

- Abkowitz, M.A. (1964): Lectures on Ship Hydrodynamics: Steering and Maneuverability. Hydro- og Aerodynamisk Laboratorium.
- El Moctar O., Lantermann U., Mucha P., Höpken J., Schellin T.E.(2014): RANS-based Simulated Ship Maneuvering Accounting for Hull-Propulsor-Engine Interaction, Ship Technology Research, Vol. 61
- International Towing Tank Conference (ITTC, 2014): Recommended Guidelines on Use of RANS Tools for Manoeuvring Prediction. 7.5-03-04-01, <http://itcc.info>, aufgerufen am 01.10.2015.
- International Towing Tank Conference (ITTC, 2014): Proceedings of the 26<sup>th</sup> ITTC, Report of the Manoeuvring Committee.
- International Maritime Organisation (IMO, 1995): Standards for Training, Certification and Watch-keeping (STCW). <http://imo.org>, aufgerufen 01.10.2015
- Mucha, P., el Moctar, O. (2015): Revisiting Mathematical Models for Manoeuvring Prediction Based on modified Taylor-series Expansions. Ship Technology Research: Schiffstechnik, 62(2):81-96
- Quadvlieg, F., Brouwers, J. (2011): KVLCC2 Benchmark Data Including Uncertainty Analysis to Support Manoeuvring Predictions. Proc. MARINE 2011.
- Sharma, S.D. (1982): Kräfte am Unter und Überwasserschiff. 18. Fortbildungskurs. Institut für Schiffbau (IfS), Hamburg.



- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV, 1994): Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (Rhein-SchPV), Bonn
- Wolff, K. (1981) Ermittlung der Manövriereigenschaften fünf repräsentativer Schiffstypen mit Hilfe von CPMC Modellversuchen. IfS-Bericht Nr. 412, Hamburg.
- Söding, H. (1984): Bewertung der Manövriereigenschaften im Entwurfsstadium. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft.
- Zorn, T., Shigunov, V. (2013): Investigation of Stability Failure of an Inland Tanker. Proc. 16<sup>th</sup> Numerical Towing Tank Symposium, Mülheim a.d.R.