



Younjun Yang. Fotos: Daniel Schumann

Für den Nachweis vorschriftenkonformer Manöviereigenschaften während der Entwurfsphase von Schiffen benötigt man Manöviermodelle. Der hier beschriebene Ansatz ermöglicht die Berechnung der Schiffsbewegungen deutlich schneller als in Echtzeit, so dass viele Manövervarianten schnell kalkuliert werden können.

Wie bewegt sich ein Schiff?

Mathematische Modelle zur Berechnung
des Manövrierverhaltens von Schiffen

Von Youjun Yang, Jens Neugebauer & Bettar O. el Moctar

Das Manövrierverhalten eines Schiffes spielt für die Sicherheit von Personen und Ladung sowie für die Wirtschaftlichkeit des Betriebs eines Schiffes eine wichtige Rolle. Der Personalmangel und die Bemühungen, die Emissionen von Schiffen zu reduzieren, haben zu einem Innovationsschub in der Binnenschifffahrt geführt. So wurden zahlreiche Projekte zum automatisierten Fahren von Binnenschiffen initiiert. Dabei stellt die Vorhersage des Manövrierverhaltens von Binnenschiffen eine wesentliche Herausforderung dar. Es geht unter anderem

um den Einfluss von Passier- und Überholvorgängen sowie sich stochastisch verändernde Umgebungsbedingungen. Der folgende Beitrag befasst sich mit den heute gängigen mathematischen Modellen zur Simulation des Manövrierverhaltens von Binnenschiffen.

Schiffe haben in ihrer Betriebszeit unterschiedliche Manövrieraufgaben zu bewältigen. Hierzu zählen auf einer vorgegebenen Bahn zu fahren, eine bestimmte Position zu halten, eine Drehung einzuleiten und abzubremesen, zu beschleunigen (Anfahrvermögen) und

abzubremsen (Stoppvermögen). Die klassische Vorgehensweise, die Manövriereigenschaften eines Schiffes zu bestimmen, besteht darin, Manövrierversuche in einem Schlepptank oder in einem Manövrierbecken durchzuführen. Dabei kann es sich um Versuche mit einem freien, selbstangetriebenen und ferngesteuerten Modell, oder um Kraftmessungen bei erzwungenen Bewegungen mit einem gefesselten Modell handeln. Auch wenn allgemeiner Konsens darüber herrscht, dass die Extrapolation der Ergebnisse der Manövrierversuche auf die Großausführung des Schiffes weniger durch Maßstabeffekte beeinträchtigt ist, als bei Widerstands- und Propulsionsversuchen, besteht nach wie vor keine genaue Kenntnis über das Ausmaß der durch solche Effekte verursachten Fehler.

Alternativ zu den physikalischen Versuchen können mathematische Modelle zur Berechnung des Manövrierhaltens von Schiffen verwendet werden. Die heute für Manövriersimulationen eingesetzten mathematischen Simulationsmodelle lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen. Es handelt sich dabei zum einen um 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 mathematischen Modelle, in denen die Kräfte am Rumpf und an den Anhängen sowie weitere äußere Einwirkungen als separate Module betrachtet werden. Hierzu gehören die Modelle von Söding¹ und von Sharma². Eine detaillierte Beschreibung unterschiedlicher Simulationsmodelle ist bei Oltmann et al.³ und Oltmann und Sharma⁴ zu finden. Die für die Manövriersimulationen benötigten hydrodynamischen Kräfte an den Anhängen und am Rumpf wurden bisher hauptsächlich experimentell oder mit Berechnungsverfahren für reibungsfreie Strömungen ermittelt und werden seit einigen Jahren zunehmend mit Feldmethoden, die auf der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen basieren, berechnet. Dazu gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, auf die hier nicht eingegangen wird.⁵

Bewegungsgleichungen

Die Bewegung eines starren Schiffes kann mit den Newton'schen Gleichungen beschrieben werden. Diese werden in das schiffsfeste Koordinatensystem (O, x_s, y_s, z_s) transformiert (Abb. 1). Zur Vereinfachung werden die Bewegungen in der horizontalen Ebene (Längs- und Querbewegung sowie Gieren) betrachtet.

Die x_s-Achse verläuft positiv nach vorne, die y_s-Achse positiv zur Steuerbordseite (Stb.) und die z_s-Achse positiv nach unten. x, y und z kennzeichnen das erdfeste Koordinatensystem. Die gestrichelte Kurve in Abbildung (1) stellt die Bahn des Schiffes dar. Der Kurswinkel **Y** ist als der Winkel zwischen der x-Achse im erdfesten Koordinatensystem und der Längsachse des Schiffes definiert.

Der Driftwinkel **b** ist der Winkel zwischen der Richtung der Schiffsgeschwindigkeit *U* (tangential zur Fahrbahn) und der Längsachse des Schiffes. *u*, *v* und *r* stellen die Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeit dar. *X* und *Y* sind die Längs- und Querkräfte und *N* das Giermoment. Der Ruderwinkel **d** ist zur Backbordseite (Bb.) positiv definiert.

Die Bewegungsgleichungen in der horizontalen Ebene im schiffsfesten Koordinatensystem lauten:

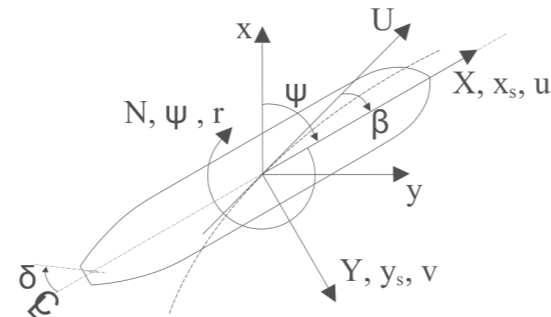
$$m(\dot{u} - vr - x_g r^2) = X \quad (1)$$

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

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

m ist die Schiffsmasse, *x_g* die Längenkoordinate des Massenschwerpunkts, und *I_z* das Massenträgheitsmoment um z-Achse. Die Lösung der nichtlinearen Bewegungsgleichungen (1) bis (3) setzt die Kenntnis der hydrodynamischen Kräfte und Momente voraus. Diese können beispielsweise durch eine direkte oder indirekte Systemidentifikation ermittelt werden. Bei der indirekten Systemidentifikation werden Kräfte und Momente über die Bewegung freifahrender Schiffe identifiziert. Hierbei kommen Modellversuche, Großausführungsmessungen und direkte numerische Manöversimulationen, basierend auf der Lösung der gekoppelten Navier-Stokes- und nichtlinearen Bewegungsgleichungen, in Frage. Ein Vorteil der indirekten Systemidentifikation besteht in der Betrachtung des Gesamtsystems (Rumpf, Propulsions- und Manövrierorgane und Antriebsanlage). Im Fall der direkten Systemidentifikation werden die Kräfte und Momente in Abhängigkeit von stationären und instationären vorgegebenen Bewegungen von gefesselten Schiffmodellen ermittelt. Hierbei können sowohl Modellversuche als auch numerische Strömungsberechnungen eingesetzt werden.⁶

In diesem Beitrag beschränken wir uns auf mathematische Modelle für die direkte Systemidentifikation. Dazu zählen Regressionsmodelle⁷ und modulare Modelle⁸.



(1) Koordinatensystem
Quelle: Mucha und el Moctar 2015

Modulare Modelle

Die Gesamtkräfte und -momente werden nach den einzelnen Bestandteilen eines Schiffes, nämlich Rumpf, Propulsions- und Manövrierorgane unterteilt:

$$X = X_S + X_P + X_R \quad (4)$$

$$Y = Y_S + Y_P + Y_R \quad (5)$$

$$N = N_S + N_P + N_R \quad (6)$$

Die Indizes S, P und R stehen für Rumpf, Propulsionsorgane und Manövrierorgane. Ein Vorteil von modularen Modellen besteht in deren Einfachheit. Die Kräfte und Momente können getrennt ermittelt werden. Die Wechselwirkung wird allerdings (in der Regel) mit einfachen halb-empirischen Verfahren berücksichtigt.⁹

Regressionsmodelle¹⁰

Der Ansatz von Abkowitz besteht darin, die hydrodynamischen Kräfte und Momente als multivariable Polynome von den Raum- und kinematischen Größen (Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) darzustellen.

$$F = f(x_0, y_0, \mathbf{y}, u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \mathbf{d}, \dot{\mathbf{d}}) \quad (7)$$

Der Kraftvektor $F = [X, Y, N]^T$ stellt die äußeren Kräfte und Momente dar. *F* wird dabei als Taylorreihe ausgedrückt und lautet:

$$X(\mathbf{x}) \approx X(\mathbf{x}_0) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial X(\mathbf{x})}{\partial x_i} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 X(\mathbf{x})}{\partial x_i^2} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 X(\mathbf{x})}{\partial x_i^3} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i^3 + \dots \right) \quad (8)$$

$$Y(\mathbf{x}) \approx Y(\mathbf{x}_0) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y(\mathbf{x})}{\partial x_i} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Y(\mathbf{x})}{\partial x_i^2} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 Y(\mathbf{x})}{\partial x_i^3} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i^3 + \dots \right) \quad (9)$$

$$N(\mathbf{x}) \approx N(\mathbf{x}_0) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial N(\mathbf{x})}{\partial x_i} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N(\mathbf{x})}{\partial x_i^2} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 N(\mathbf{x})}{\partial x_i^3} \Big|_{\mathbf{x}_0} \Delta x_i^3 + \dots \right) \quad (10)$$

Wobei

$$\mathbf{x} = [x_0, y_0, \mathbf{y}, u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \mathbf{d}, \dot{\mathbf{d}}]^T \quad (11)$$

t steht für die Zeit.

Das Modell geht von einem Gleichgewichtszustand aus, wie zum Beispiel die Geradeausfahrt mit der Längsgeschwindigkeit $u = U_0$, Quergeschwindigkeit $v = 0$, Drehrate $r = 0$ und dem Ruderwinkel $\mathbf{d} = 0$. Die Abweichung von diesem Gleichgewichtszustand ist $\Delta x = x - x_0$. Die partiellen Ableitungen der Kräfte *X*, *Y*, *N* nach den Zustandsgrößen *x* werden wie folgt dargestellt:

$$X_v = \frac{\partial X}{\partial v} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}, X_{vv} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 X}{\partial v^2} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}, \dots \quad (12)$$

Die partiellen Ableitungen werden als hydrodynamische Koeffizienten bezeichnet.

Es wird angenommen, dass die Kräfte und Momente nur von den Bewegungsgrößen zum aktuellen Zeitpunkt abhängen. Die sogenannten „memory“-Effekte der Strömung um das Schiff werden vernachlässigt. Es können außerdem verschiedene Annahmen getroffen werden. So wird oft der Einfluss der Ableitungen des Ruderwinkels **d** nicht betrachtet.

Ein Beispiel eines mathematischen Modells ist in den Gleichungen (13) bis (15) dargestellt:

$$X = X_u \dot{u} + X_u \Delta u + X_{uu} \Delta u^2 + X_{uuu} \Delta u^3 \quad (13)$$

$$+ X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{vr} vr + X_{v\delta} v \delta + X_{r\delta} r \delta$$

$$+ X_{vuu} v^2 \Delta u + X_{rru} r^2 \Delta u + X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + X_{vru} vr \Delta u + X_{v\delta u} v \delta \Delta u + X_{r\delta u} r \delta \Delta u$$

$$Y = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_{vvv} v^3 + Y_r r + Y_{rrr} r^3 + Y_{\delta} \delta + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \quad (14)$$

$$+ Y_{vrr} vr^2 + Y_{v\delta\delta} v \delta^2 + Y_{rvv} rv^2 + Y_{r\delta\delta} r \delta^2 + Y_{\delta vv} \delta v^2 + Y_{\delta rr} \delta r^2 + Y_{vr\delta} vr \delta$$

$$+ Y_{vu} v \Delta u + Y_{ru} r \Delta u + Y_{\delta u} \delta \Delta u + Y_{vuu} v \Delta u^2 + Y_{ruu} r \Delta u^2 + Y_{\delta uu} \delta \Delta u^2$$

$$N = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_{vvv} v^3 + N_r r + N_{rrr} r^3 + N_{\delta} \delta + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 \quad (15)$$

$$+ N_{vrr} vr^2 + N_{v\delta\delta} v \delta^2 + N_{rvv} rv^2 + N_{r\delta\delta} r \delta^2 + N_{\delta vv} \delta v^2 + N_{\delta rr} \delta r^2 + N_{vr\delta} vr \delta$$

$$+ N_{vu} v \Delta u + N_{ru} r \Delta u + N_{\delta u} \delta \Delta u + N_{vuu} v \Delta u^2 + N_{ruu} r \Delta u^2 + N_{\delta uu} \delta \Delta u^2$$

Im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs Schiffbau 98 (SFB 98) wurde das Abkowitz-Modell basierend auf zahlreichen systematischen Modellversuchen modifiziert und erweitert. Die hydrodynamischen Kräfte *X*, *Y*, *N* wurden (als *F* ausgedrückt) wie folgt berechnet¹¹:

$$F = F(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta)$$

$$= F_0 u^2 + F_u u \Delta u + F_{uu} \Delta u^2 + F_{uuu} \frac{\Delta u^3}{u}$$

$$+ F_{\dot{u}} \dot{u} + F_{\dot{u}\dot{u}} \frac{\dot{u}^2}{u^2} + F_{\dot{u}\dot{u}\dot{u}} \frac{\dot{u}^3}{u^4} + F_{\dot{u}\dot{u}} \frac{\dot{u} \Delta u}{u} + F_{\dot{u}\dot{u}\dot{u}} \frac{\dot{u} \Delta u^2}{u^2}$$

$$+ F_v uv + F_{vv} v^2 + F_{vvv} \frac{v^3}{u} + F_{vvvv} \frac{v^4}{u^2} + F_{vvvvv} \frac{v^5}{u^3} + F_{v|v|} |v| |v|$$

$$+ F_{\dot{v}} \dot{v} + F_{\dot{v}\dot{v}} \frac{\dot{v}^2}{u^2} + F_{\dot{v}\dot{v}\dot{v}} \frac{\dot{v}^3}{u^4} + F_{\dot{v}\dot{v}} \frac{\dot{v} v}{u} + F_{\dot{v}\dot{v}\dot{v}} \frac{\dot{v} v^2}{u^2}$$

$$+ F_r ur + F_{rr} r^2 + F_{rrr} \frac{r^3}{u} + F_{rrrr} \frac{r^4}{u^2} + F_{rrrrr} \frac{r^5}{u^3} + F_{r|r|} |r| |r|$$

$$+ F_{\dot{r}} \dot{r} + F_{\dot{r}\dot{r}} \frac{\dot{r}^2}{u^2} + F_{\dot{r}\dot{r}\dot{r}} \frac{\dot{r}^3}{u^4} + F_{\dot{r}\dot{r}} \frac{\dot{r} r}{u} + F_{\dot{r}\dot{r}\dot{r}} \frac{\dot{r} r^2}{u^2}$$

$$+ F_{\delta} u^2 \delta + F_{\delta\delta} u^2 \delta^2 + F_{\delta\delta\delta} u^2 \delta^3 + F_{\delta\delta\delta\delta} u^2 \delta^4 + F_{\delta\delta\delta\delta\delta} u^2 \delta^5 + F_{\delta|\delta|} u^2 |\delta| |\delta|$$

$$+ F_{vu} v \Delta u + F_{vuu} \frac{v \Delta u^2}{u} + F_{vvu} \frac{v^2 \Delta u}{u} + F_{vvuu} \frac{v^3 \Delta u}{u^2} + F_{v|v|} |v| |v| \frac{\Delta u}{u}$$

$$+ F_{ru} r \Delta u + F_{ruu} \frac{r \Delta u^2}{u} + F_{rru} \frac{r^2 \Delta u}{u} + F_{rruu} \frac{r^3 \Delta u}{u^2} + F_{r|r|} |r| |r| \frac{\Delta u}{u}$$

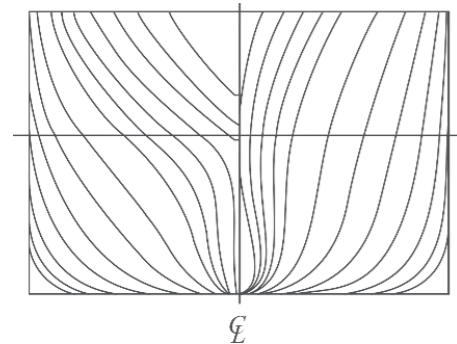
$$+ F_{\delta u} u \delta \Delta u + F_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + F_{\delta\delta u} u \delta^2 \Delta u + F_{\delta\delta\delta u} u \delta^3 \Delta u + F_{\delta|\delta|} u |\delta| |\delta| \Delta u$$

$$+ F_{vr} vr + F_{vrr} \frac{vr^2}{u} + F_{vrrr} \frac{vr^3}{u^2} + F_{vvr} \frac{v^2 r}{u} + F_{vvrr} \frac{v^2 r^2}{u^2}$$

$$+ F_{vvr} \frac{v^3 r}{u^2} + F_{v|r|} |v| |r| + F_{r|v|} |r| |v|$$

$$\begin{aligned}
 &+ F_{vu}v\Delta u + F_{vuu} \frac{v\Delta u^2}{u} + F_{vuu} \frac{v^2\Delta u}{u} + F_{vvuu} \frac{v^3\Delta u}{u^2} + F_{v|v|u}v|v| \frac{\Delta u}{u} \\
 &+ F_{ru}r\Delta u + F_{ruu} \frac{r\Delta u^2}{u} + F_{rru} \frac{r^2\Delta u}{u} + F_{rrru} \frac{r^3\Delta u}{u^2} + F_{r|r|u}r|r| \frac{\Delta u}{u} \\
 &+ F_{\delta u}u\Delta u + F_{\delta uu}\delta\Delta u^2 + F_{\delta\delta u}u\delta^2\Delta u + F_{\delta\delta\delta u}u\delta^3\Delta u + F_{\delta|\delta|u}u|\delta|\Delta u \\
 &+ F_{vr}vr + F_{vrr} \frac{vr^2}{u} + F_{vrrr} \frac{vr^3}{u^2} + F_{vvr} \frac{v^2r}{u} + F_{vvrr} \frac{v^2r^2}{u^2} \\
 &+ F_{vvvr} \frac{v^3r}{u^2} + F_{v|v|r}v|r| + F_{r|v|r}r|v| \\
 &+ F_{v\delta}uv\delta + F_{v\delta\delta}uv\delta^2 + F_{v\delta v}v^2\delta + F_{v|\delta|u}u|v|\delta + F_{v|\delta|}u|v|\delta| \\
 &+ F_{r\delta}ur\delta + F_{r\delta\delta}ur\delta^2 + F_{r\delta r}r^2\delta + F_{r|\delta|u}u|r|\delta + F_{r|\delta|}ur|\delta| \\
 &+ F_{vru} \frac{vr\Delta u}{u} + F_{v\delta u}v\delta\Delta u + F_{r\delta u}r\delta\Delta u + F_{vrr\delta}vr\delta
 \end{aligned}$$

Zur Berechnung der Kräfte und Momente müssen die hydrodynamischen Koeffizienten ermittelt werden. Wolff¹² hat das mathematische Modell (Gl. 16) für fünf repräsentative Schiffe (Tanker, Massengutschiff, Mariner-Schiff, Containerschiff und Fähre) angewendet. Dabei hat er die hydrodynamischen Koeffizienten (Tab. 2) über eine direkte Systemidentifikation ermittelt. Hierzu hat er umfangreiche Modellversuche durchgeführt. In diesem Beitrag beschränken wir uns auf Manöversimulationen des Mariner-Schiffes, dessen Hauptabmessungen in Tabelle (1) zusammengefasst sind. Der dazugehörige Spantenriss ist in Abbildung (2) dargestellt.



(2) Spantenriss des Mariner-Schiffes. Quelle: Mucha und el Moctar 2015

(T1) Hauptabmessungen: Länge zwischen den Loten L , Breite der Wasserlinie B_{wl} , Tiefgang T , Blockkoeffizient C_b , Längskoordinate des Gewichtsschwerpunkts x_g im schiffsfesten Koordinatensystem, Initialgeschwindigkeit des Schiffes U_0 , geometrischer Maßstabsfaktor λ .

	L [m]	B_{wl} [m]	T [m]	C_b [-]	x_g [m]	U_0 [kn]	λ [-]
Mariner	160,93	23,18	7,45	0,60	-3,48	15	25

Die hydrodynamischen Kräfte (X, Y) und Momente (N) werden, wie üblich, dimensionslos dargestellt, siehe Gleichungen 17 und 18.

$$X' = \frac{X}{0.5\rho u^2 L^2}, \quad Y' = \frac{Y}{0.5\rho u^2 L^2} \quad (17)$$

$$N' = \frac{N}{0.5\rho u^2 L^3} \quad (18)$$

Zur Validierung des mathematischen Modells (Gl. 17) wurden von Wolff¹³ sowie von Mucha und el Moctar¹⁴ Manöver simuliert und mit Versuchsergebnissen verglichen. Die nichtlinearen Bewegungsgleichungen wurden in der Zeit mittels der Runge-Kutta-Methode 4. Ordnung integriert. Die Simulations- und Versuchsergebnisse der Zick-Zack-Manöver sind in den Abbildungen (3) und (4) gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Simulationen und Experimente stimmen weitestgehend gut überein. Für die Drehkreismanöver standen keine Messergebnisse zur Verfügung.

Die Manövriermodelle mit ihren schiffsspezifischen hydrodynamischen Koeffizienten bieten also die Möglichkeit, die Bewegungen manövrierender Schiffe zu berechnen. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt dabei von der gezielten Auswahl der enthaltenen hydrodynamischen Koeffizienten, also der mathematischen Formulierung eines Manövriermodells, sowie einer präzisen Systemidentifikation ab. Die Formulierung von Manövriermodellen kann, je nach Zielsetzung und äußeren Randbedingungen, wie zum Beispiel Flachwasser oder der Einschränkung auf bestimmte Manöver, angepasst werden. Mit steigender Zahl der hydrodynamischen Koeffizienten wird die Systemidentifikation allerdings aufwändiger, weil mehr Versuche oder Simulationen erforderlich sind.

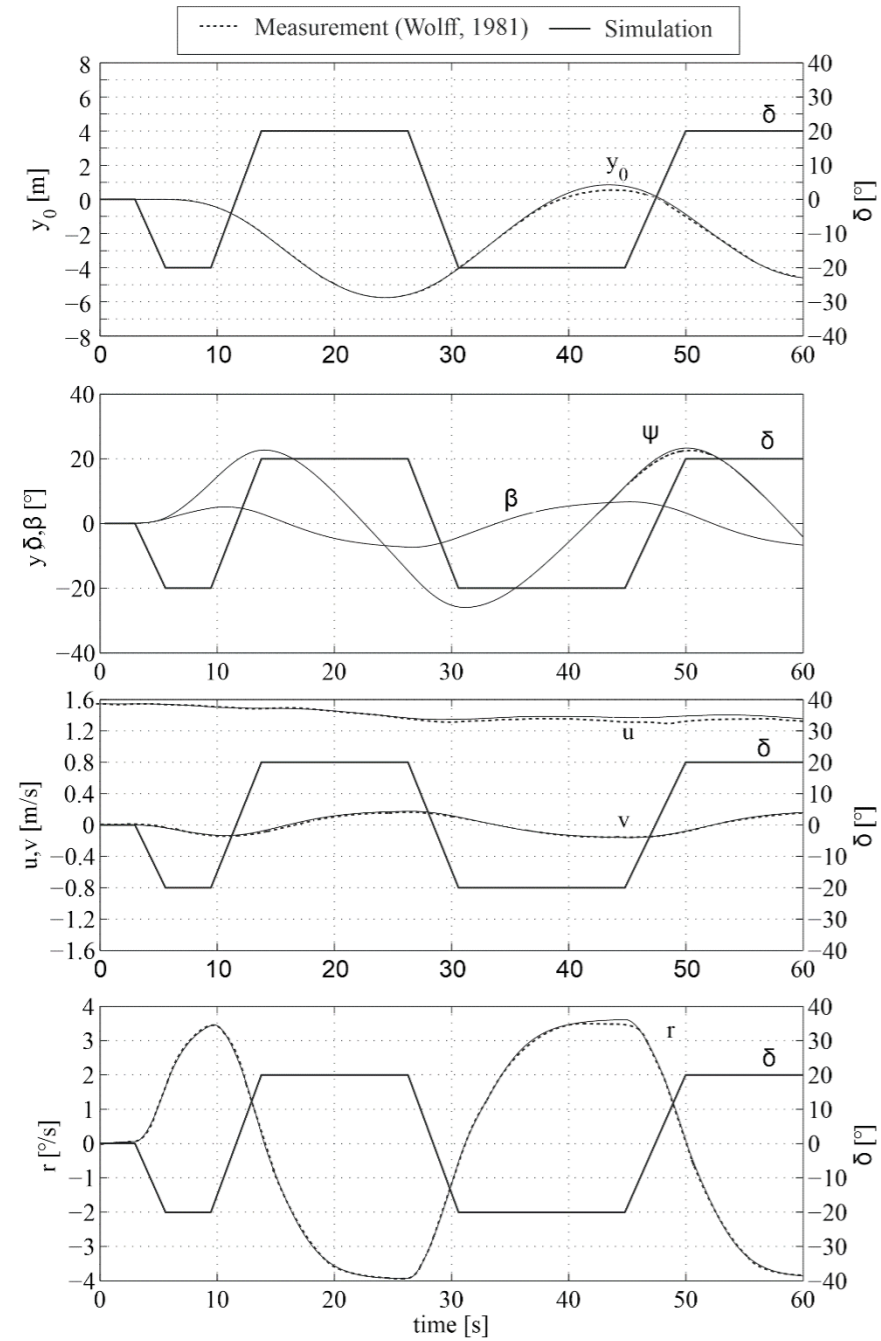
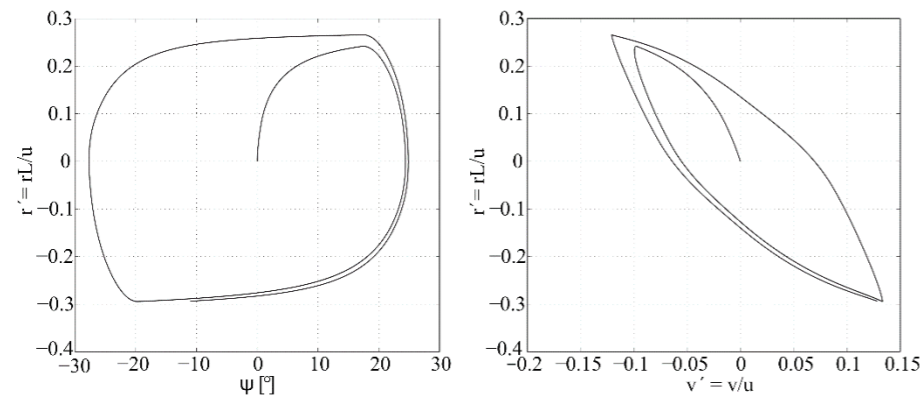
Der Nachweis vorschriftenkonformer Manöviereigenschaften während der Entwurfsphase von Schiffen stellt nur eine Anwendung für Manövriermodelle dar. Da die Berechnung der Schiffsbewegungen mit dem beschriebenen Ansatz deutlich schneller als in Echtzeit durchgeführt werden kann, können beispielsweise viele Varianten von Manövern in sehr kurzer Zeit berechnet werden. Dies ist zum Beispiel dann von Interesse, wenn Befahrbarkeitsanalysen für kritische Wasserstraßenabschnitte oder Hafeneinfahrten durchgeführt werden sollen oder in komplizierten Verkehrssituationen sichere Routen für Schiffe ermittelt werden sollen. Im Zuge der Entwicklung automatisierter Schiffe spielen Manövriermodelle also eine wichtige Rolle.

Die oben vorgestellten mathematischen Modelle werden derzeit im Rahmen von Forschungsvorhaben für Flachwasserbedingungen und für Überhol-, beziehungsweise Passiervorgänge erweitert. Weiterhin werden in Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen der Regelungstechnik und der Mechatronik datenbasierte Modelle entwickelt und validiert.

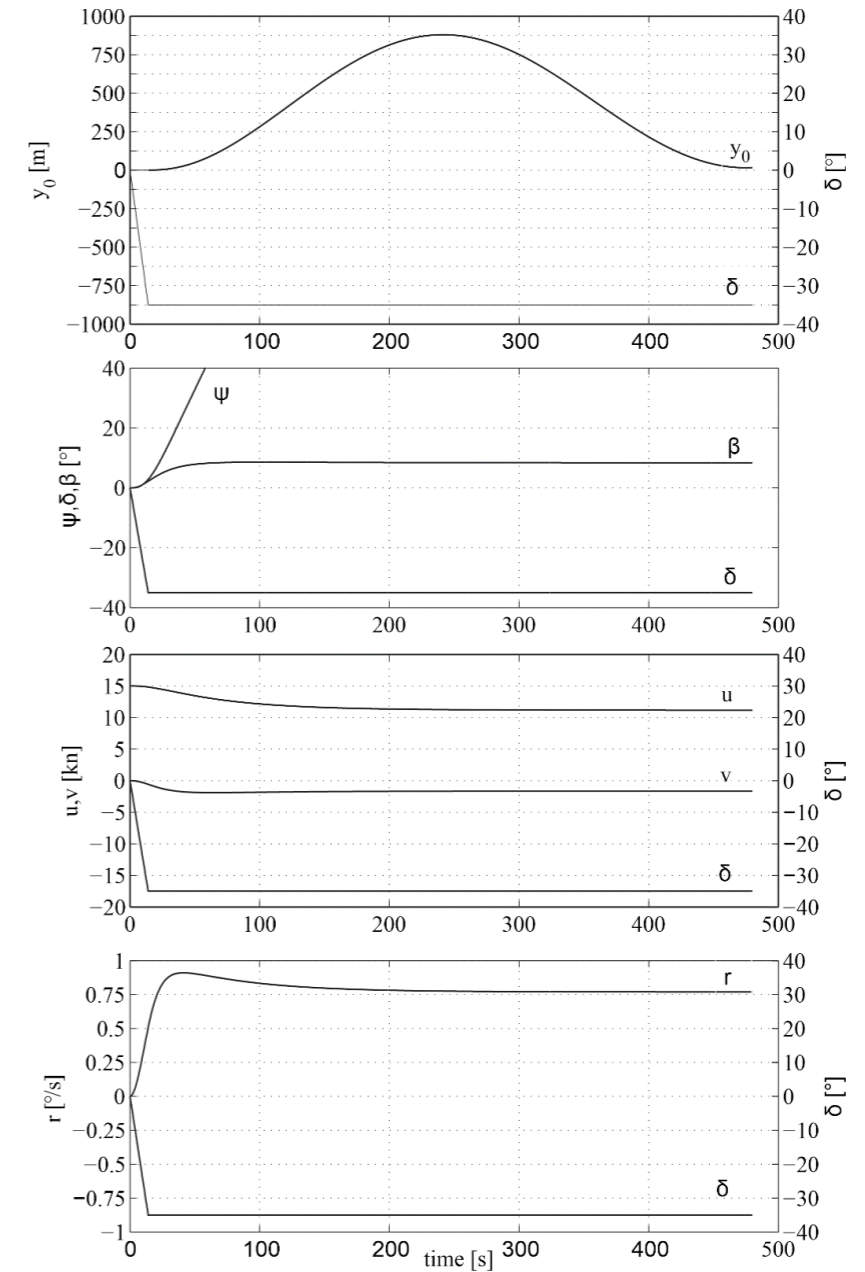
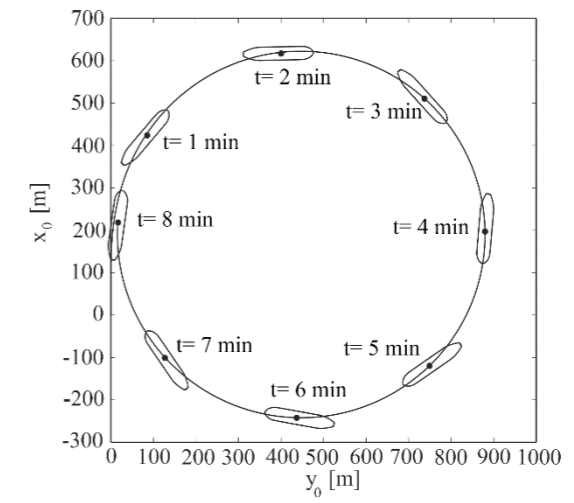
(T2) Dimensionslose hydrodynamischen Koeffizienten. Zahlenwerte sind mit 10^{-6} zu multiplizieren.

Quelle: Wolf 1981

X'_u	-214,4	X'_{rrr}	-191,6	Y'_v	-7488,7	$Y'_{\delta u}$	-3711,2	N'_v	78,2	N'_{rrr}	-1134,0
X'_{uuu}	0	$X'_{\delta\delta u}$	1408,1	Y'_{vvv}	-41070,3	$Y'_{\delta\delta\delta u}$	5871,7	N'_{vvv}	849,4	N'_{ru}	-135,7
X'_u	-2760,8	$X'_{\delta\delta\delta}$	957,6	Y'_r	-143,7	$Y'_{v v }$	0	N'_r	-444,3	N'_{ruu}	0
X'_{uu}	0	X'_{vvvu}	-22765,0	Y'_{rrr}	-1303,6	$Y'_{r r }$	1789,6	N'_{rrr}	210,9	N'_{rvv}	0
X'_{uuu}	-2210,3	$X'_{v r }$	-674,9	Y'_0	-20,3	$Y'_{v r }$	-6183,2	N'_0	8,1	$N'_{r\delta\delta}$	1300,4
X'_{vv}	-4657,7	$X'_{v \delta }$	-158,3	Y'_u	-208,1	$Y'_{r v }$	6443,5	N'_u	64,8	N'_δ	-1282,4
X'_{rr}	-432,7	X'_v	-220,4	Y'_v	-11592,7	$Y'_{\delta v }$	2065,8	N'_v	-3466,7	$N'_{\delta\delta}$	-236,1
$X'_{\delta\delta}$	-1420,4	X'_{rru}	0	Y'_{vvv}	-95040,1	$Y'_{\delta r }$	845,5	N'_{vv}	0	$N'_{\delta\delta\delta}$	3401,2
X'_{vuu}	0	m'	7973,6	Y'_{vrr}	-22143,2	Y'_{vuu}	-3614,4	N'_{vvv}	0	$N'_{\delta\delta\delta\delta}$	441,1
$X'_{\delta\delta u}$	1944,4	x'_G	-176,2/m'	$Y'_{v\delta\delta}$	1490,1	$Y'_{r \delta }$	-1031,0	N'_{vu}	0	$N'_{\delta\delta\delta\delta}$	-2014,5
X'_{vr}	2304,9	I'_z	428,0	Y'_r	3529,0	$Y'_{v\delta}$	559,1	N'_{vrr}	3870,5	$N'_{\delta vv}$	0
$X'_{v\delta}$	1013,7			Y'_{rrr}	744,1	$Y'_{\delta \delta }$	1984,3	$N'_{v\delta\delta}$	0	$N'_{\delta rr}$	0
$X'_{r\delta}$	-485,1			Y'_{ru}	-1405,7	Y'_{vvvr}	8131,5	N'_r	-2083,3	$N'_{\delta u}$	1997,9
X'_{vu}	2052,6			Y'_{rvv}	0	Y'_{rrru}	1806,2	$N'_{\delta uu}$	408,6	$N'_{\delta\delta u}$	361,9
X'_{ru}	-388,9			$Y'_{r\delta\delta}$	0			$N'_{\delta\delta\delta u}$	-2737,3	$N'_{v v }$	1687,3
X'_r	279,7			Y'_δ	2640,4			$N'_{r r }$	-485,0	N'_{vr}	0
X'_δ	54,2			$Y'_{\delta\delta}$	675,4			$N'_{\delta \delta }$	-100,8	N'_{vvvu}	-35494,9
$X'_{\delta uu}$	2296,4			$Y'_{\delta\delta\delta}$	-6868,9			N'_{rrru}	0	N'_{rru}	152,1
$X'_{vv\delta}$	0			$Y'_{\delta\delta\delta\delta}$	-1317,7			$N'_{r v }$	-7199,6	$N'_{\delta v }$	-1066,4
$X'_{rr\delta}$	0			$Y'_{\delta\delta\delta\delta\delta}$	4105,7			$N'_{\delta r }$	-471,3	$N'_{v \delta }$	349,9
X'_{vvv}	0			$Y'_{\delta rr}$	0			$N'_{r \delta }$	-381,3	$N'_{v\delta}$	-296,1



(3) Simulierte und gemessene 20°/10° Zick-Zack-Manöver für das Mariner-Schiff im Modellmaßstab
Quelle: Mucha und el Moctar (2015)



(3) (4) Simulierte 35°-Drehkreismanöver für das Mariner-Schiff in Großausführung
Quelle: Mucha und el Moctar (2015)

Summary

The assessment of a ship's manoeuvrability is crucial because it affects the ship's safety, the transportation of the cargo and the ship's operational efficiency. In this field, there has been a surge in navigational innovations due to not only the shortage of qualified mariners necessary to operate these ships but also the need to reduce emissions. Numerous projects have been initiated to advance the automated navigation of inland waterway ships. However, predicting the behaviour of a ship manoeuvring on an inland waterway constitutes a major challenge. This article deals with the mathematical models for ship manoeuvring commonly used today. One manoeuvring model is presented in particular, which was applied to compute the behaviour of a typical inland waterway ship. The behaviour it predicted is compared with existing model test experiments.

Anmerkungen

- 1) Söding 1984
- 2) Sharma 1982
- 3) Oltmann et al. 2000
- 4) Oltmann und Sharma 1984
- 5) Zu erwähnen sind die folgenden Publikationen, Simonsen et al 2003; el Moctar 1998, 2001; el Moctar et al. 2001; Cura 1998, 2006, 2008 und Jacquin et al. 2006
- 6) s. The International Towing Tank Conference 2011, 2014, 2017
- 7) Abkowitz, 1964
- 8) Söding, 1984; Sharma 1982
- 9) Beispiele für modulare Modelle sind in Söding 1984 und Sharma 1982 zu finden.
- 10) Die folgende Beschreibung basiert auf den Veröffentlichungen von Mucha und el Moctar 2015 sowie Wolff 1981.
- 11) Wolff 1981
- 12) Wolff 1981
- 13) Wolff 1981
- 14) von Mucha und el Moctar 2015

Literatur

– Abkowitz, M. A.: Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and Maneuverability, Hydro- og Aerodynamisk Laboratorium, Lyngby/Dänemark, Report No. Hy-5, 1964.

- Cura Hochbaum, A., Vogt, M. und Gatchell, S.: Manoeuvring prediction for two tankers based on RANS calculations, SIMMAN 2008, Copenhagen, 2008.
- Cura Hochbaum, A.: Virtual PMM Tests for Manoeuvring Prediction, 26th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, 2006.
- Cura Hochbaum, A.: Computation of the turbulent flow around a ship model in steady turn and in oblique motion, 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998.
- el Moctar, O., Junglewitz A., Stadie-Frohbes, G.: Numerical Analysis of Steering Capability of a Podded Drive, Ship Technology Research Journal, 07/2004 pp. 134–145.
- el Moctar, O.: Numerical Computations of Flow Forces in Ship Manoeuvring, Ship Technology Research Journal, 09/2001, pp. 98–123.
- el Moctar, O., Muzaferija S.: Numerical Determination of Rudder Forces, Proceedings of European Mechanics Society (EUROMECH) 374, Poitiers, 1998.
- Mucha, P.; el Moctar, O.: Revisiting mathematical models for manoeuvring prediction based on modified Taylor-series expansions, Ship Technology Research Journal, 62(2), 2015, 81–96.
- The International Towing Tank Conference: Recommended Procedures and Guidelines, Captive Model Test Procedures, 7.5-02-06-02, 2014.
- The International Towing Tank Conference: Recommended Procedures and Guidelines, Guideline on Use of RANSE Tools for Manoeuvring Prediction, 7.5-03-04-01, 2017.
- The International Towing Tank Conference: The Manoeuvring Committee, Final report and recommendations to the 26th ITTC, Proceedings of 26th ITTC, Volume I, Rio de Janeiro, 2011.
- Jacquin, E., Guillerm, P.-E., Drouet, A., Perdon, P., und Alessandrini, B.: Simulation of unsteady ship maneuvering using free-surface RANS solver, 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2006.
- Oltmann, P., Sharma, S. D.: A simulation of combined engine and rudder manoeuvres using an improved model of hull-propeller-rudder interactions, Proceedings of the 15th Symposium of Naval Hydrodynamics, 1984.
- Oltmann, P., Söding, H. und Cura Hochbaum, A.: Manövrieren – Standortbestimmungen und Perspektiven, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 2000.
- Sharma, S. D.: Kräfte am Unter- und Überwasserschiff, 18. Fortbildungskurs „Manövrieren xi“, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1982.
- Simonsen, C., Stern, F.: Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle on forces and moments, Computers and Fluids, 32/2003, 1325–1356.
- Söding, H.: Bewertung der Manöviereigenschaften im Entwurfsstadium, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1984.
- Wolff, K.: Ermittlung der Manöviereigenschaften fünf repräsentativer Schiffstypen mit Hilfe von CPMC-Modellversuchen, Institut für Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 412, 1981.

Die Autoren

Youjun Yang ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen. Von 2012 bis 2017 hat er sein Maschinenbaustudium mit der Vertiefungsrichtung auf Schiffstechnik an der Universität Duisburg-Essen abgeschlossen. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in der numerischen Strömungsmechanik und der Modellierung des Manövrierverhaltens von Schiffen.

Jens Neugebauer ist Oberingenieur am Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen und Stellvertreter des Lehrstuhlinhabers. Im Jahr 2006 hat er sein Diplomstudium der Schiffstechnik an der Universität Duisburg-Essen abgeschlossen. Er ist seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme und promovierte 2015 mit der Dissertation „Conception and Validation of a Sloshing Test Facility Including an Assistance Approach for Sloshing Impact Loads“. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in der experimentellen Strömungsmechanik, der Analyse von Schiffsbetriebsdaten und der Automatisierung von Schiffen.

Bettar el Moctar ist Leiter des Instituts für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme an der Universität Duisburg-Essen und Direktor der Versuchsanstalt DST. Er schloss sein Schiffbaustudium 1997 an der Universität Hamburg ab. Zunächst hat er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in verschiedenen Abteilungen der Technischen Universität Hamburg gearbeitet, wo er sich auf Schiffshydrodynamik und Fluidodynamik spezialisierte. Im Jahr 2000 nahm er seine Tätigkeit bei der Hamburgischen Schiffsbau-Versuchsanstalt auf und arbeitete als Ingenieur. Bettar el Moctar promovierte 2001 an der Technischen Universität Hamburg mit der Dissertation „Numerische Berechnung der Strömungskräfte beim Manövrieren von Schiffen“. Von 2002 bis 2016 war er für den Germanischen Lloyd und DNV GL (Hamburg) in verschiedenen Funktionen (Ingenieur, Leiter der Abteilung Fluidodynamik, Forschungskoordinator für maritime advisory) tätig. Im Jahr 2008 übernahm er an der Universität Duisburg-Essen den Lehrstuhl für Schiffs- und Offshoretechnik. Seit 2014 ist Bettar el Moctar Direktor und Vorsitzender des Vorstands der Versuchsanstalt DST. Er ist Herausgeber (Editor) bzw. Mitherausgeber (Co-Editor) mehrerer internationaler Fachzeitschriften. Seine Publikationen umfassen verschiedene Aspekte im maritimen Kontext. Weiterhin ist er in zahlreichen nationalen und internationalen Gremien tätig.



Jens Neugebauer (oben), Bettar O. el Moctar (unten). Fotos: Daniel Schumann

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online



Offen im Denken



Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/78092

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230331-115259-6

Erschienen in: UNIKATE 59 (2023), S. 22-31

Alle Rechte vorbehalten.