

# Manövrierverhalten

## Systemidentifikation manövrierender Schiffsmodelle

Henning Weede

Der Autor:

Dr.-Ing. Henning Weede,  
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Die Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH hat im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten FuE-Vorhabens „Systemidentifikation manövrierender Schiffsmodelle“ ein Verfahren entwickelt, um das Manövrierverhalten von Schiffsmodellen mit empirischen Bewegungsgleichungen numerisch zu simulieren und die Koeffizienten dieser Gleichungen aus Messungen zu gewinnen. Neu daran ist, dass das Verfahren ohne Kraftmessungen und ohne PMM (Planar Motion Mechanism)-Anlage auskommt und allein Bewegungsmessungen benötigt. Damit ist die Möglichkeit geschaffen, auch solche Manövrieruntersuchungen anzustellen, für die der Platz in der Schlepprinne nicht ausreicht, z.B. Ermittlung der Steuerkurve.

### Architektur der Software

Das Schiffsmodell wird in der Schlepprinne speziellen Quell-Manövern unterzogen, und seine Bewegungen und der Zeitverlauf des Ruderwinkels und ggf. weiterer Steuersignale wird als je eine Messdatei pro Fahrt gespeichert. Nach dem Glätten, Filtern und Stutzen der Zeitreihen dienen die Messdaten als Eingabematerial des Systemidentifikationsmoduls. Dieses erzeugt eine Liste mit Funktionsnummern und Koeffizientenwerten, die anschließend von Simulationsmodulen verwendet werden können, um aus einem beliebigen zeitlichen Verlauf von Ruderwinkel und anderen Steuersignalen zu errechnen, mit welchen Bewegungen das Schiffsmodell reagiert (Abb.1).

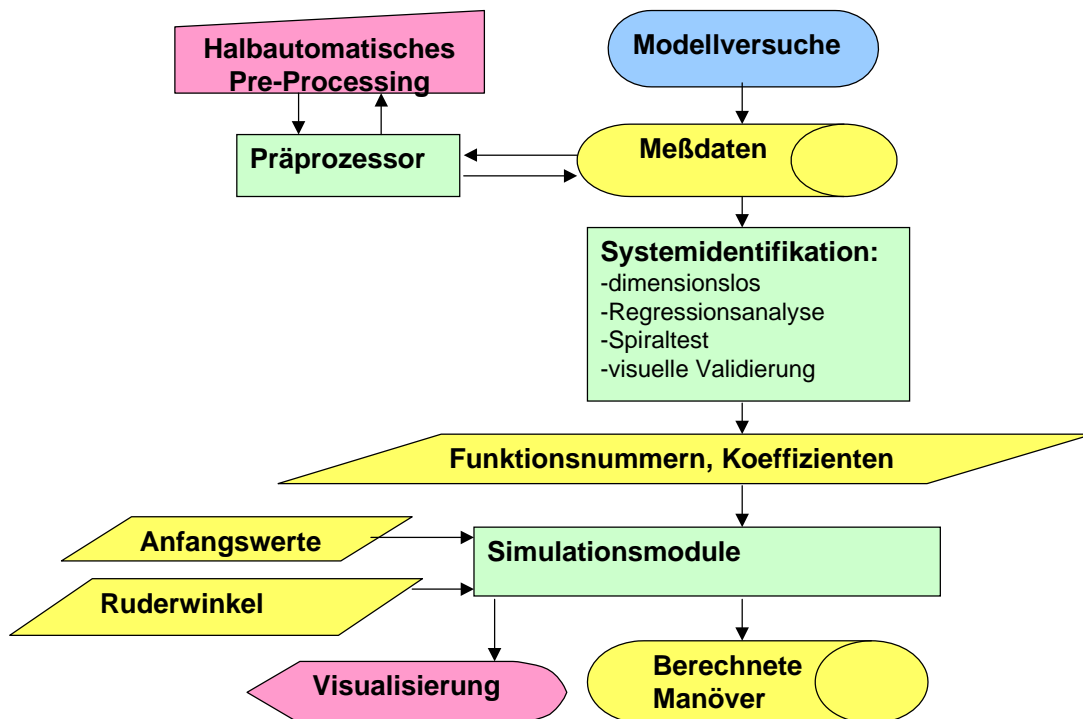


Abb.1: Aufbau der Software

Von den physikalischen Grundlagen zum numerischen Modell

Die Bewegungsgleichungen stellen den Zusammenhang zwischen der Längs-, Quer- und Tauchgeschwindigkeit  $u, v, \dot{z}$ , Roll- Stampf- und Giergeschwindigkeit  $\dot{\varphi}, \dot{\theta}, r$ , Längs- Quer- und Vertikalkraft  $X, Y, Z$  und Krängungs-, Trimm- und Giermoment  $K, M, N$ . her:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \begin{bmatrix} M \\ M \\ M \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ \dot{z} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ r \end{pmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{z} & v & 0 & -r & 0 \\ \dot{z} & 0 & -u & r & 0 & 0 \\ -v & u & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ M \\ M \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ \dot{z} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X(u, v, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, r, \Delta z, \varphi, \theta, \underline{\delta}) \\ Y(u, v, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, r, \Delta z, \varphi, \theta, \underline{\delta}) \\ Z(u, v, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, r, \Delta z, \varphi, \theta, \underline{\delta}) \\ K(u, v, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, r, \Delta z, \varphi, \theta, \underline{\delta}) \\ M(u, v, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, r, \Delta z, \varphi, \theta, \underline{\delta}) \\ N(u, v, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, r, \Delta z, \varphi, \theta, \underline{\delta}) \end{pmatrix}$$

Hydrodynamische Trägheitskräfte sind darin mit der Trägheit des Schiffes zusammengefasst und werden durch die Massenmatrix [ M ] beschrieben, die auch hydrodynamische Anteile enthält. Die Kräfte enthalten auch hydrostatische Anteile, die von Tauchauslenkung, Krängungs-, und Trimmwinkel abhängen, weshalb die zusätzlichen drei Bewegungskordinaten,  $\Delta z, \varphi, \theta$ , drei zusätzliche Gleichungen erfordern:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Delta z \\ \varphi \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{z} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}$$

Der Ruderwinkel wurde mit etwaigen weiteren Steuersignalen zum Vektor  $\underline{\delta}$  zusammengefasst. Längs- und Quergeschwindigkeit werden durch Gesamtgeschwindigkeit  $U$  und Gierwinkel  $\beta$  ersetzt. Längen werden mit der Schiffslänge  $L$  und Zeiten mit der Zeit  $L/U$  dimensionslos gemacht. Dann entsteht aus den (bis zu) neun Gleichungen ein Gleichungssystem, das für jede dimensionslose Beschleunigungskomponente dieselbe Form annimmt:

$$\partial X_i / \partial t^* = f_i(X_1, X_2, X_3, \dots, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots)$$

Die wichtigsten dimensionslosen Bewegungskordinaten sind die dimensionslose Drehrate  $X_1 = r^* = rL/U$ , der Gierwinkel  $X_2 = \beta = -\arctan(v/u)$  und die dimensionslose Gesamtgeschwindigkeit  $X_3 = U^* = \ln(U/U_0)$ . Für die dimensionslosen Beschleunigungen wird angesetzt:

$$\partial X_i / \partial t = \sum_{(j)} f_{ij}(X_1, X_2, \dots, \delta_1, \delta_2, \dots) c_{ij}$$

mit

$$f_{ij} = f_{ij1}(X_1) \cdot f_{ij2}(X_2) \cdot \dots \cdot g_{ij1}(\delta_1) \cdot g_{ij2}(\delta_2) \cdot \dots$$

Das numerische Modell besteht aus einer Tabelle. Jede Zeile beschreibt einen Summanden. Die Ziffer in der ersten Spalte bezeichnet, zu welcher Beschleunigungskomponente der Summand beiträgt. Danach folgen Kennziffern, die die miteinander zu multiplizierenden Ansatzfunktionen der einzelnen Bewegungskordinaten und Steuersignale bezeichnen. Implementiert wurden Polynome und Sinus- und Cosinusfunktionen. In der letzten Spalte stehen die Werte der Koeffizienten. Das Systemidentifikationsmodul erfüllt die Aufgabe, diese Koeffizienten dergestalt zu berechnen, dass die mittlere quadratische Abweichung zwischen Messung und Ansatz minimal wird. Ein stark vereinfachtes Beispiel soll dies verdeutlichen. Folgender Ansatz für Gierwinkel  $\beta$  und dimensionslose Drehrate  $r^*$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t^*} = c_1 \beta + c_2 r^* + c_3 \delta \qquad \frac{\partial r^*}{\partial t^*} = c_4 r^* + c_5 r^{*3} + c_6 \delta$$

ergibt bei einer Minimierung der mittleren quadratischen Abweichung Messung-Rechnung folgende Gleichungssysteme für die Koeffizienten:

$$\sum_{(T^*)} \int \begin{bmatrix} \beta^2 & \beta r^* & \beta \delta \\ \beta r^* & r^{*2} & r^* \delta \\ \beta \delta & r^* \delta & \delta^2 \end{bmatrix} dt^* \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{Bmatrix} = \sum_{(T^*)} \int \frac{\partial \beta}{\partial t^*} \begin{Bmatrix} \beta \\ r^* \\ \delta \end{Bmatrix} dt^*$$

$$\sum_{(T^*)} \int \begin{bmatrix} r^{*2} & r^{*4} & r^* \delta \\ r^{*4} & r^{*6} & r^{*3} \delta \\ r^* \delta & r^{*3} \delta & \delta^2 \end{bmatrix} dt^* \begin{Bmatrix} c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{Bmatrix} = \sum_{(T^*)} \int \frac{\partial r^*}{\partial t^*} \begin{Bmatrix} r^* \\ r^{*3} \\ \delta \end{Bmatrix} dt^*$$

Anhand geeigneter Messdateien, je eine Datei pro Fahrt (Manöver) in der Schlepprinne, werden die Matrizen der Gleichungssysteme wie angedeutet zeitlich und über alle Dateien gemittelt.

### Beispiele

Die aus Messwerten modellierte Drehbeschleunigungsfunktion zeigt das Diagramm, Abb.2.

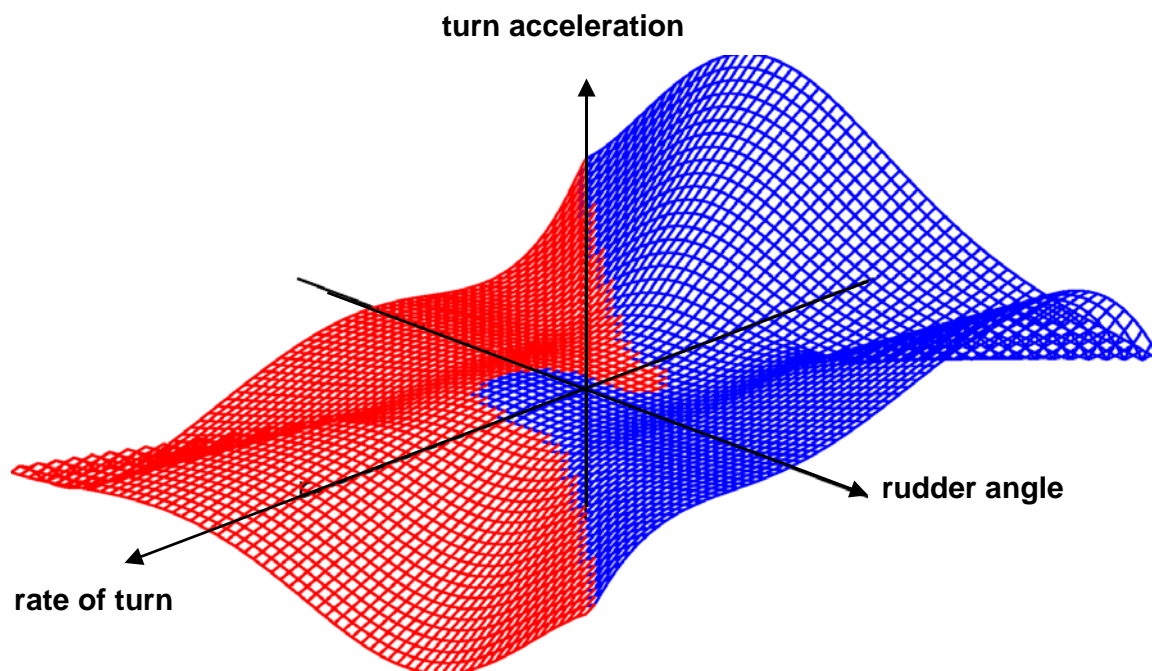


Abb.2 Aus Messwerten modellierte Drehbeschleunigungsfunktion

Als Grenze zwischen positiv (blau) und negativ (rot) ist die Steuerkurve zu erkennen. Dieses Beispiel zeigt ein gierinstabiles Schiff, da die Steuerkurve eine Hystereseschleife bildet. Im Achsenkreuz, das aus Drehrate, Gierwinkel und Ruderwinkel aufgespannt wird, lassen sich den einzelnen Betriebspunkten die Beschleunigungsvektoren zuordnen. Es ergibt sich ein Vektorfeld, das auf die Steuerkurve gerichtet ist. Das Diagramm, Abb.3, zeigt einen Schnitt für einen beispielhaften Ruderwinkel (Messwerte rot, Systemidentifikationsergebnis blau).

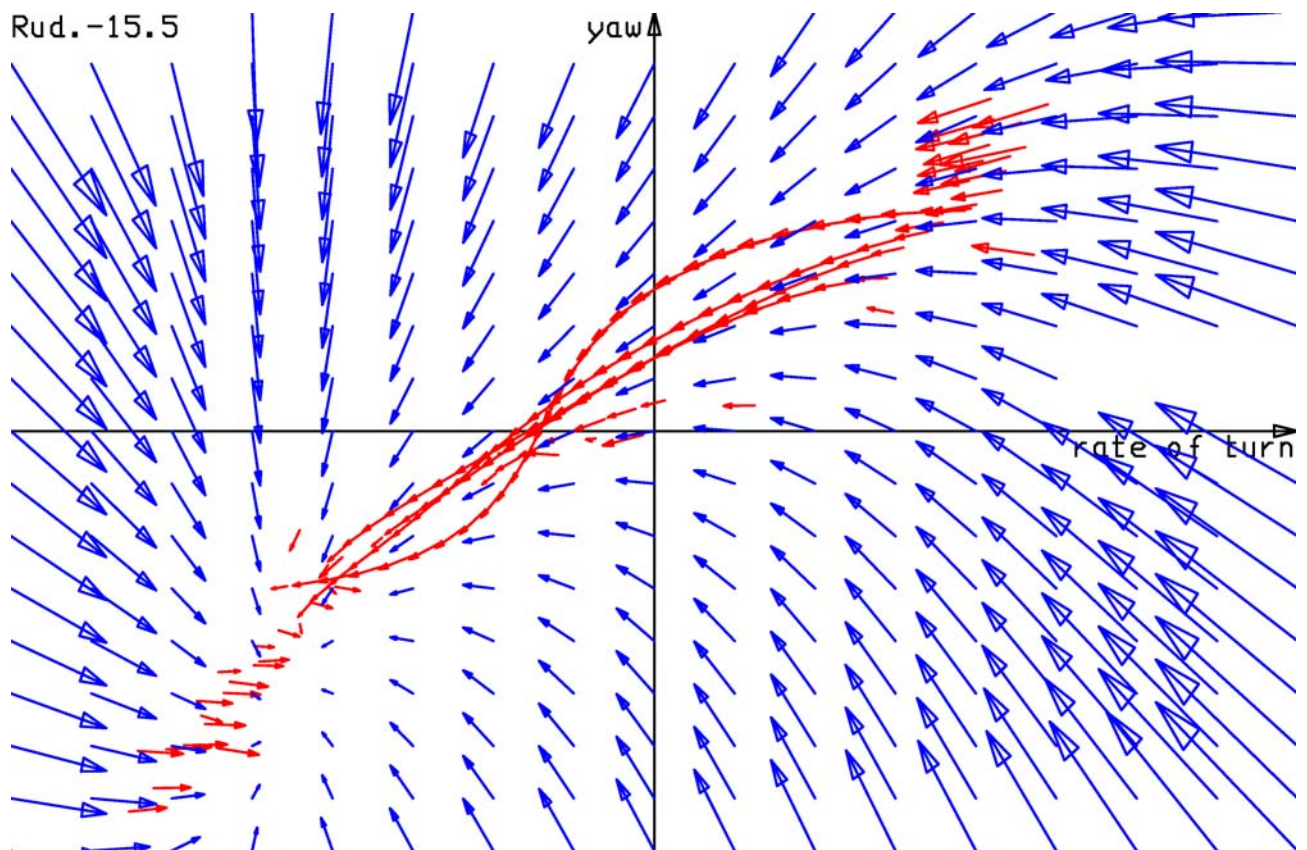


Abb.3: Schnitt für einen beispielhaften Ruderwinkel

Um zu verhindern, dass eine numerische Bewegungssimulation auf der Basis der Systemidentifikationsergebnisse in Bereichen, die nicht von Messwerten abgedeckt sind, numerisch instabil wird, wurde besonders darauf geachtet, dass das Vektorfeld im äußeren Bereich nach innen gerichtet ist.

#### Ressourcenbedarf

Zur Gewinnung von Messergebnissen in möglichst vielen Betriebspunkten mit möglichst wenigen Fahrten wurde eine Modifikation des Z-Manövers entwickelt, wobei der Gegenrunder auslösende Kurswinkel bei jeder Schwingung vergrößert wird. Die einzelnen Fahrten unterscheiden sich zusätzlich in der Ruderwinkelamplitude voneinander. Zumindest bei Gier-Instabilität sind ergänzend Serien von Anschwenkversuchen sinnvoll. Der Maßbedarf schwankt zwischen sieben und 28 Fahrten pro Zustand (Geschwindigkeit, Tiefgang). An Hardware sind Antriebsmotoren und Rudermaschinen inkl. Steuereinheiten mit Rechneranschluss erforderlich, ferner ein Kreiselkompass und eine Anlage zur Positionsmessung. Die Manöver werden von Mausklick bis Mausklick vollautomatisch durch den Rechner durchgeführt. Der Schleppwagen fährt dem frei fahrenden Modell voraus und ist über einen Kabelbaum mit diesem verbunden, der mit Hilfe eines Auslegers von Hand so nachgeführt wird, dass keine Kräfte und Momente eingeleitet werden. Bei besonderen Genauigkeitsanforderungen kann ein rechnergeregelter Luftpropeller für richtungstreue Schubentlastung sorgen, damit die Antriebsdrehzahl maßstabsgetreu eingestellt werden kann. Der Personalbedarf beläuft sich auf Kabelbaumfahrer, Schleppwagenfahrer, Fänger und Rechnerbediener (gleichzeitig Versuchsleiter).

## Zusammenfassung

Es ist gelungen, ein Systemidentifikationsverfahren für manövrierende Schiffsmodelle zu entwickeln, das kostengünstiger arbeitet als bisherige Verfahren, da es ohne Kraftmessungen und PMM-Anlage auskommt. Anstatt Kraftbeiwerte (dimensionslosen Kräfte) werden Beschleunigungsbeiwerte ermittelt. Die funktionale Abhängigkeit der dimensionslosen Beschleunigungen von den dimensionslosen Geschwindigkeiten und vom Ruderwinkel (und ggf. weiterer Steuersignale) kann durch manuellen Entwurf einer Funktionsnummerntabelle flexibel angesetzt werden. Das Systemidentifikationsmodul errechnet aus gemessenen Quellmanövern die Koeffizienten. Hauptanwendungsgebiet der Methode ist die numerische Simulation von Manövern, für die die Schlepprinne zu schmal ist. Die Übergabe der tabellarisch vorliegenden Systemidentifikationsergebnisse an Simulatoren Dritter ist prinzipiell ebenfalls vorstellbar.