

Ein generisches Regelungskonzept für die autonome Schifffahrt

Agnes U. Schubert, Bereich Seefahrt, ISSIMS

agnes.schubert@hs-wismar.de

Martin Kurowski, Torsten Jeinsch

Institut für Automatisierungstechnik, Universität Rostock

martin.kurowski@uni-rostock.de

Zusammenfassung

Maritime Fahrzeuge sind je nach Typ und Antriebskonfiguration für verschiedene Fahrregime konzipiert, die sich allgemein in Transitfahrt, Manövrieren sowie Dynamisches Positionieren unterteilen lassen. Die drei Modi divergieren sowohl in dynamischen Eigenschaften als auch geforderter Regelgüte, weshalb dafür jeweils separate Regelungsansätze entwickelt wurden. In diesem Beitrag wird ein hybrides Konzept vorgestellt, das für diverse maritime Fahrzeuge in allen drei Modi appliziert werden kann. Ausgehend von einer generalisierten Modellierung der Übergänge zwischen einzelnen Bewegungszuständen bei klassifizierten Störungen werden Vorsteuerung, Allokation und Regelung entwickelt. Der Ansatz wird beispielhaft an Simulationen mit einem Fährschiff in einem nautischen Schiffsführungssimulator verdeutlicht.

1 Einleitung

Der maritime Sektor steht gegenwärtig vor einem großen technologischen Wandel wachsender Schiffsdimensionen, steigendem Verkehrsaufkommen und vielfältiger neuer Anwendungen im Offshore-Bereich. Um dennoch die Sicherheit, Effizienz und geringe Umweltbelastung insbesondere im Hafen oder in engen Fahrwassern zu gewährleisten, bedarf es eines höheren Aufwands in der Schiffsführung und Koordination. Wie Statistiken zeigen, gehen über 90% der maritimen Unfälle auf menschliche Fehlentscheidungen zurück, so dass es durch Kollision oder Grundberührung bis zum Verlust des Fahrzeugs kommen kann sowie unabsehbare Schäden für Mensch und Umwelt entstehen [1].

Um das Unfallrisiko zu minimieren, ist es deshalb sinnvoll, den Navigationsprozess mit einem Assistenzsystem zu unterstützen [2], das zusätzliche bzw. genauere Informationen über den Bewegungszustand des Fahrzeugs und die Umgebung liefert, vor Gefahren warnt und Empfehlungen für Ausweichmanöver gibt. Solch ein Assistenzsystem basiert auf einem hinreichend genauen dynamischen Bewegungsmodell des Fahrzeugs, das die Maschinendynamik und die Reaktion auf Umweltstörungen einschließt. Anhand des Modells kann prädiziert werden, welche Bewegung aus den aktuellen Stell- und Störgrößen resultiert. Neben dem Modell gehören deshalb intelligente Sensorsysteme zur Erkennung der Bewegungs- und der Umgebungszustände sowie ein Planungstool zur Basis eines Assistenzsystems. In einer Ausbaustufe verfügt

es über einen Regler, der die Differenz zwischen einer zuvor geplanten Sollbahn und der Istbahn automatisch und nach ausgewählten Kriterien minimiert.

Im Verbundprojekt *GALILEOnautic* soll ein solches Assistenzsystem entwickelt werden. Perspektivisch ist es für vollautomatisierte Fahrzeuge ausgelegt, die insbesondere in kritischen Bereichen und in der Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern effektiv navigieren können. Die einzelnen Partner sind für verschiedene Bereiche verantwortlich: die Fusion der Daten von Standardschiffssensoren mit hoch präzisen GNSS-Daten (Global Navigation Satellite System) sowie den Daten aus einer Nahfeldererkennung, die zentrale Koordination der Fahrzeuge sowie die automatische Berechnung von Ausweichbahnen und die Bahnregelung für das einzelne Schiff. Die der Regelung zugrundeliegenden Modelle sollen die drei Fahrregime Transitfahrt, Manövrieren und Dynamisches Positionieren (DP) abbilden.

In diesem Projekt wird für die Regelung ein neuer generischer Ansatz verfolgt. Die bisherige Praxis weist eine strikte Trennung der automatischen Schiffsführung zwischen Spezialschiffen im Arbeitsbereiches des DP [3] und Standardschiffen bei Transitfahrt [4] auf. Schiffe mit klassischen Propeller-Ruderantrieben wie Fähren, Fracht- und Kreuzfahrtschiffen werden auf offener See, während der sogenannten Transitfahrt, mittels Kurs- oder Bahnregler bei gleichbleibender Geschwindigkeit betrieben. Für DP-Schiffe sind hochdynamische Antriebssysteme eine zwingende Voraussetzung, die ein genaues Positionieren insbesondere für Offshore-Aufgaben ermöglichen. Moderne DP-Schiffe verfügen über eine Reihe von Reglermodulen, die auch den Transit zum Einsatzort automatisch abfahren können. Hingegen gibt es für das Manövrieren von nicht DP-fähigen Schiffen in engen Fahrwassern keine Automationslösungen, nicht zuletzt wegen fehlender rechtlicher Rahmenbedingungen.

2 Systemkonzept

Perspektivisch muss für die autonome Schifffahrt ein Automationskonzept entwickelt werden, das für jeden Bewegungsmodus gleichermaßen greift. Wie in Abbildung 1 dargestellt, operieren die Schiffe in den Bereichen Transitfahrt und Manövrieren sowie bei einer entsprechenden Ausstattung im DP-Modus. Die Operationsbereiche unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit und die notwendige Regelgüte. Die Transitfahrt ist eine Vorausfahrt auf offener See bei hoher Geschwindigkeit, die eine Kollisionsverhütung mit größerem Zeithorizonten erlaubt. Von Manövrieren wird gesprochen, wenn es sich um Geschwindigkeiten zwischen $\pm 3\text{m/s}$ handelt und Distanzen zu anderen Fahrzeugen bzw. Kaianlagen von wenigen Metern einzuhalten sind. In diesem Operationsmodus werden Manöver mit signifikanten Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen durchgeführt, das Fahrzeug dreht oder traversiert beispielsweise unter Einsatz aller Stell- und Antriebsorgane. Der hybride generische Ansatz erlaubt zudem klassifizierte Störungen einzubeziehen, die in durch Wind, Strömung oder andere Umweltfaktoren den Prozess beeinflussen.

Dem Konzept liegt eine stark vereinfachte Modellstruktur zugrunde, die alle auftretenden Kräfte und Momente am Schiffskörper und den angefügten Teilen sowie resultierend aus der Bewegung durch das Fluid oder durch Variabilität der Antriebe in den sechs Freiheitsgraden zusammenfassen. Die Modellierung basiert auf einer Linearisierung im Arbeitspunkt. Der

Übergang zwischen zwei Arbeitspunkten wird dadurch generalisiert, dass er ausschließlich vom aktuellen Bewegungszustand und der Differenz zum darauffolgend kommandierten Zustand abhängt. Dieser neu kommandierte Zustand resultiert aus den Kräften und Momenten, die von den Antriebs- und Steuerorganen generiert werden. Wie in Abbildung 1 schematisch angedeutet, ergibt sich durch diesen Ansatz in jedem der drei Bereiche eine unendliche Anzahl von Arbeitspunktmodellen, so dass der Übergang von einem Arbeitspunkt in den nächsten bereichsübergreifend quasikontinuierlich erfolgen kann.

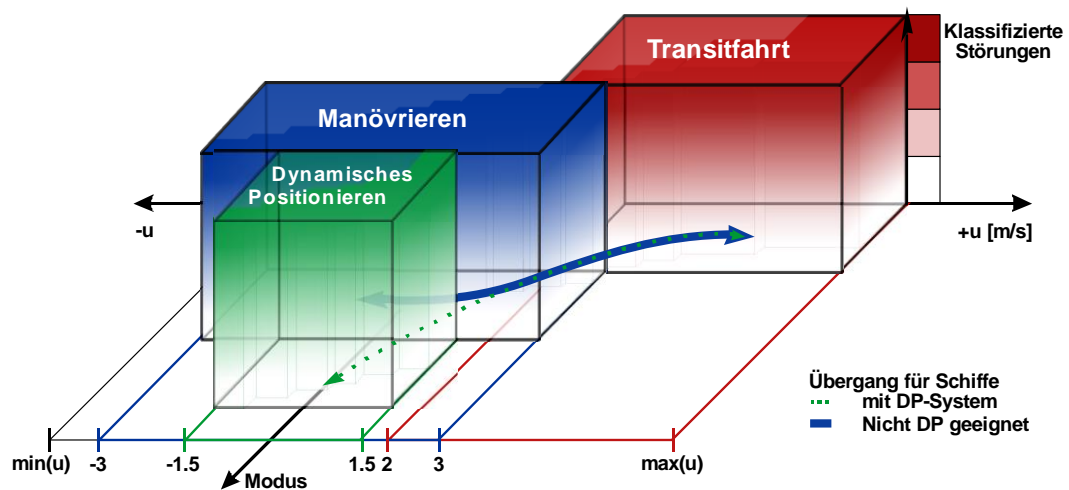


Abbildung 1: Generische Beschreibung der Bewegung verschiedener Schiffstypen

3 Planarer Modelansatz

Das planare Modell stellt in einer weiteren Vereinfachung die Bewegung von Oberflächenfahrzeugen in lediglich drei Freiheitsgraden dar: die Kräfte in Längs- und Querrichtung X und Y sowie das Moment um die Hochachse N des Fahrzeugs. Dabei resultiert die beschleunigte Bewegung des Fahrzeugs aus der Differenz der Antriebskräfte (X_p, Y_p, N_p) und der Widerstandskräfte bzw. -momente (X_r, Y_r, N_r) in der jeweiligen Richtung, wie es die Gleichungen (1)-(3) zeigen. Die Antriebskräfte und -momente stellen die Summe aller durch die Antriebe und Steuereinheiten hervorgerufenen Kräfte und Momente dar. Den Antriebskräften entgegen wirken die Widerstandskräfte, die insbesondere durch die angreifenden hydrodynamischen Kräfte und die Reibungskräfte gebildet werden. Das Modell kann in einen statischen und einen dynamischen Teil gegliedert werden.

Der stationäre Zustand ist durch eine konstante Geschwindigkeit gekennzeichnet, so dass die linke Seite der Gleichungen zu Null wird, d.h. Antriebs- und Widerstandskräfte befinden sich im Gleichgewicht. Wie in Gleichung (4) für die Längsbewegung dargestellt, kann aus diesem Zusammenhang die stationäre Antriebskraft berechnet werden, die sich aus einer definierten Antriebskonfiguration ergibt. Die Widerstandskraft im stationären Zustand berechnet sich aus der Dichte des Wassers ρ , der Querschnittsfläche A_x des Schiffes in dieser Bewegungsrichtung, einem Formfaktor c_x sowie der erzielten stationären Geschwindigkeit u . Die Konstanten werden in k_{xr} zusammengefasst. Im statischen Teil des Modells müssen demnach alle Kombinationen von Antriebs- und Steuerstellgrößen mit hinreichender Rasterung abgebildet sein. Es

gilt einerseits zu berücksichtigen, dass Steuerorgane wie das Ruder in Abhängigkeit von der aktuellen Geschwindigkeit einen Widerstand in Längsrichtung darstellen. Andererseits sind die Wirkungen der Steuerorgane in Querrichtung und um die Hochachse Funktionen der Längsgeschwindigkeit.

$$m_x \dot{u} = X_p - X_r \quad (1)$$

$$m_y \dot{v} = Y_p - Y_r \quad (2)$$

$$J_{zz} \dot{r} = N_p - N_r \quad (3)$$

$$X_r = \frac{\rho}{2} \cdot A_x \cdot c_x \cdot u^2 = k_{xr} \cdot u^2 \quad (4)$$

Das dynamische Verhalten der Schiffsbewegung in den drei Freiheitsgraden kann jeweils durch eine Verzögerungsstrecke 1. Ordnung abgebildet werden. Damit wird der Forderung nach einer einfachen Modellstruktur nachgekommen. Wie in den Gleichungen (5) – (8) wiederum exemplarisch für die dominierende Längsbewegung hergeleitet, ergibt sich diese Struktur aus einer Linearisierung im Arbeitspunkt, die kleine Änderungen voraussetzt. Mit dem identifizierten Modell konnte jedoch gezeigt werden, dass auch bei größeren Änderungen der Eingangskräfte die wesentliche Charakteristik mit hinreichender Genauigkeit wiedergespiegelt wird. Die Zeitkonstanten wurden mit dem Nelder-Mead-Simplex-Verfahren für Konvergenzprobleme identifiziert, wobei sie sich als Funktion der aktuellen Geschwindigkeit und der Sprunghöhe der Eingangskräfte ergibt.

$$\dot{u} = \frac{1}{m_x} (X_p(t) - k_{xr} u^2(t)) \quad (5)$$

$$\Delta \dot{u} = f(X_{p0}, u_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial X_p} \right|_{X_p=X_{p0}, u=u_0} (X_p - X_{p0}) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{X_p=X_{p0}, u=u_0} (u - u_0) \quad (6)$$

$$\Delta \dot{u} = \frac{1}{m_x} (X_{p0} - k_{xr} u_0^2) + \frac{1}{m_x} (X_p - X_{p0}) - \frac{2k_{xr}}{m_x} u_0 (u - u_0) \quad (7)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta X_p} = \frac{\frac{1}{k_{xr}}}{1 + \frac{m_x}{2k_{xr} u_0} s} = \frac{k_1}{1 + T_1 s} \quad (8)$$

Die weiteren Details des Modells sollen anhand des Beispiels des Simulatorschiffs Mecklenburg-Vorpommern erläutert werden. In Abbildung 2 ist die Struktur des 3 DOF-Modells mit den Ein- und Ausgängen sowie den Querkopplungen zu sehen. Das Fährschiff (FS) verfügt über zwei verstellbare Pitch-Propeller, hinter denen jeweils ein Ruder angebracht ist. Hinzu kommt ein Bugstrahlruder. Neben den Initialwerten für die Geschwindigkeiten u , v und r gehen diese fünf Stellgrößen über den Aktor-Bus als Eingangsgrößen in das Modell ein. Ausgangsgrößen stellen die aktuellen Zustandsgrößen des Modells dar. Die Struktur des Gesamtmodells zeigt die Kopplungen zwischen den Teilmodellen für die Geschwindigkeiten u , v und r . Dominierend ist die Längsgeschwindigkeit u , die sowohl die resultierende Quergeschwindigkeit v als auch die Rotationsgeschwindigkeit r aufgrund der Stellgrößenänderung bestimmt. Eine weitere Kopplung besteht zwischen Rotations- und Quergeschwindigkeit, die durch Zentripetal- und Corioliseffekte verursacht wird.

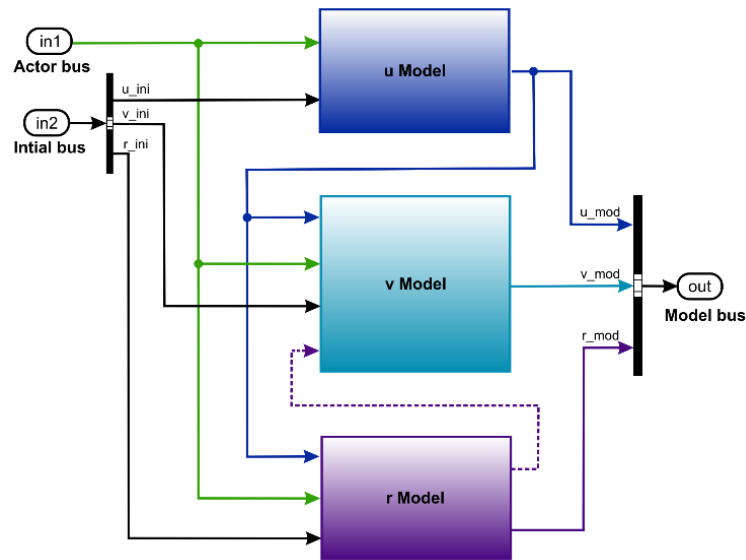


Abbildung 2: Planare 3 DOF-Modellstruktur

Abbildung 3a zeigt die Struktur des u -Teilmodells für das Fährschiff, dessen statische Komponente sich auch in Gleichung (9) wiederfindet. Die Hauptantriebskraft X_{2EOT} wird durch die Pitch-Propeller erzeugt, die in einer Lookup-Table hinterlegt sind und so die Kombinationen der Drehzahlwerte für den Backbord- und den Steuerbord-Propeller zwischen $\pm 100\%$ abdeckt. Bei gleichzeitigem Ruder- oder Thrustereinsatz wird diese Kraft um $X_{diffRud}$ oder $X_{diffThr}$ reduziert. Die Lookup-Tables für diese Differenzkräfte verwenden als Eingang den Ruderwinkel bzw. den Thruster-Wert ($\pm 100\%$) und jeweils die aktuelle Längsgeschwindigkeit des Modells, die sich zwischen $-6,5$ und $11,5$ m/s liegt. In Abbildung 3 b) ist beispielhaft die Lookup-Table für die Kraft $X_{diffThr}$ dargestellt. Es wird deutlich, dass bei $u = -2$ m/s und einem Thrusterwert von $\pm 100\%$ die größte Differenzkraft auftritt, während die Differenz bei Geschwindigkeiten über 5 m/s praktisch vernachlässigbar ist. Gleichung (10) gibt anhand von $X_{diffRud}$ ein Beispiel, wie die Teilkräfte identifiziert werden. Zunächst wird die stationäre Geschwindigkeit für konstante identische Propellerdrehzahlen ermittelt, bevor ein konstanter Ruderwerte gelegt wird, der zu einer neuen reduzierten Geschwindigkeit führt. Die Gleichungen (11) und (12) zeigen die statischen Komponenten für die Querkraft Y_p und das Moment um die Hochachse N_p , für deren Identifizierung die gleichen Messungen verwendet werden wie für die X -Komponenten.

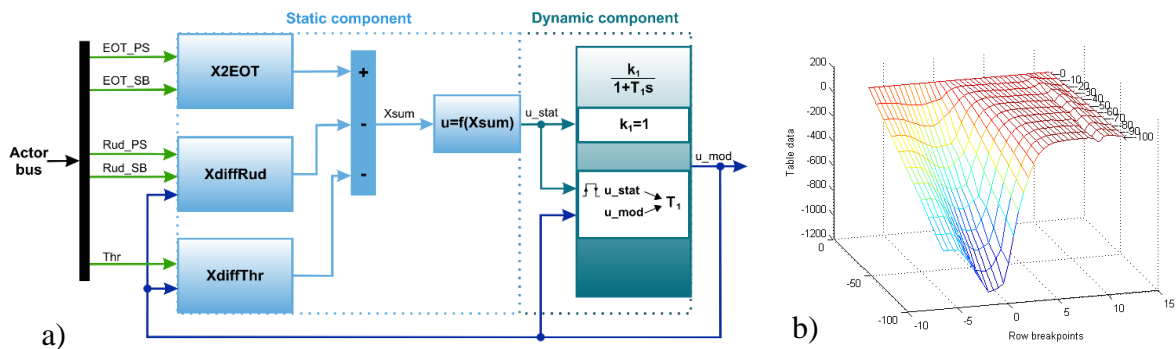


Abbildung 3: a) Struktur des u -Teilmodells mit der Unterteilung in statische und dynamische Komponente b) Lookup-Table $X_{diffThr}$ als Funktion von u und Thruster-Wert

$$X_p = X_{2EOT} - X_{diffRud}(u) - X_{diffThr}(u) - X_{diffEOT} \quad (9)$$

$$X_{diffRud} = k_{xr} \cdot [(u^2_{2EOT}) - (u^2_{2EOT+Rud})] > 0 \quad (10)$$

$$Y_p = Y_{Rud}(u) + Y_{Thr}(u) + Y_{diffEOT} \quad (11)$$

$$N_p = N_{Rud}(u) + N_{Thr}(u) + N_{diffEOT} \quad (12)$$

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse des Modells anhand eines komplexen Anlegemanövers dargestellt, wie es der Nautiker fahren würde, wobei parallel mehrere Antriebs- bzw. Stellorgane benutzt werden, deren Stellgrößen zudem großen Änderungen unterliegen. Unterhalb des Stellgrößen-Plots sind die Modellplots und die am Simulator aufgezeichneten Plots für die Geschwindigkeiten u , v und r abgebildet. Trotz der Komplexität des Manövers präsentiert das Modell überzeugend die Dynamik des Prozesses für alle drei Zustandsgrößen.

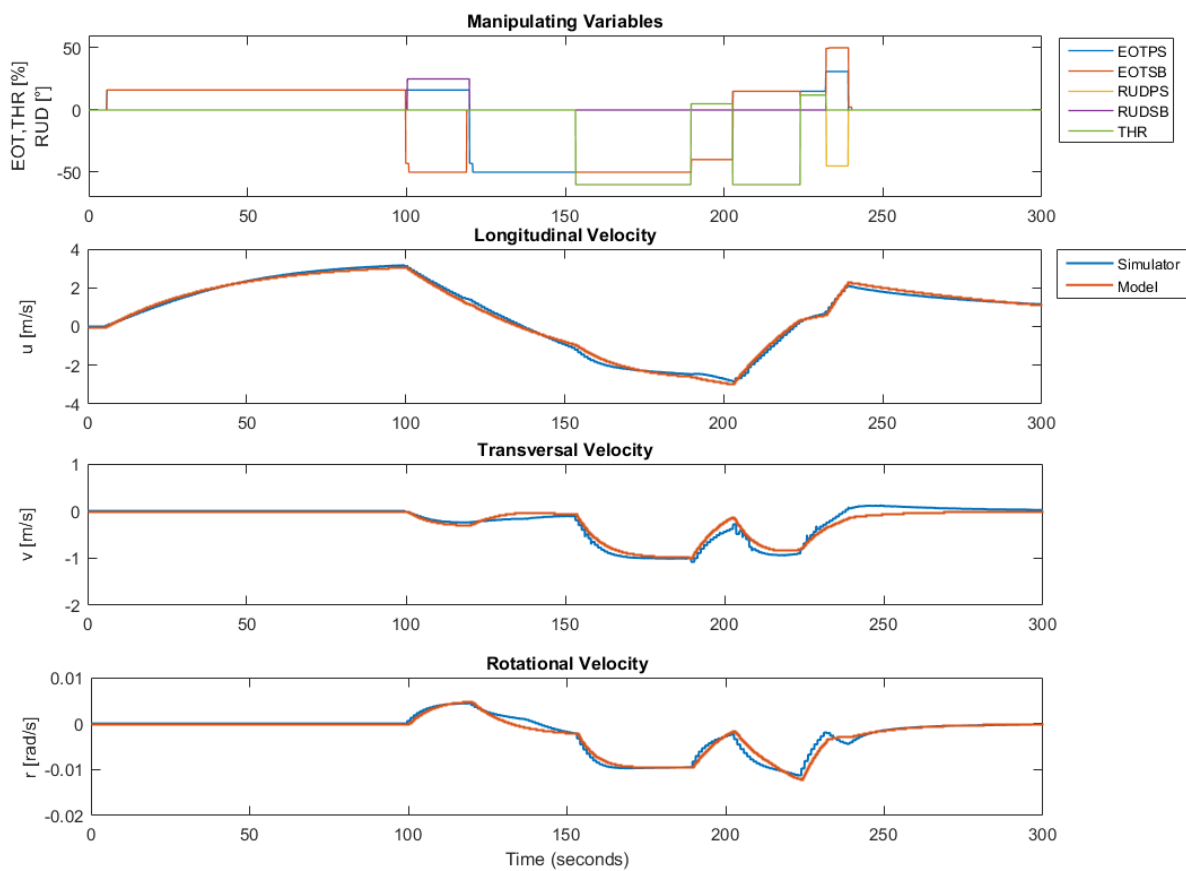


Abbildung 4: Ergebnisse der Modellierung für ein komplexes Anlegemanöver

4 Regelungsansatz

Das hybride, nichtlineare Modellkonzept bildet die Grundlage, um die Regelungsstruktur für den realen Prozess zu entwickeln, wobei der hybride Ansatz weiter konsequent verfolgt wird. Es wird vorausgesetzt, dass für das Fahrzeug eine Sollbahn geplant wurde, die mit Referenzwerten wie Heading, Lage und Position hinterlegt ist oder bei Bedarf entsprechend der geänderten Bedingungen neu optimiert wird. In einer übergeordneten Regelungsstruktur findet

somit eine Bahnregelung statt, um die Differenz zwischen der Istbahn und der geplanten Sollbahn zu minimieren. Die Struktur ist variabel, je nach dem für welches Fahrtregime sie appliziert werden soll. Der Bahnregelung ist eine einheitliche Geschwindigkeitsregelung untergeordnet, die sich unmittelbar aus dem beschriebenen Geschwindigkeitsmodell ableiten lässt. Die Geschwindigkeitsregelung wirkt direkt auf die Antriebs- und Stellorgane, um die gewünschte Längs-, Quer- und Rotationsgeschwindigkeit zu erzielen, die von der Bahnregelung geliefert werden.

Im Allgemeinen besteht die Struktur einer Geschwindigkeitsregelung aus drei Modulen, wie sie in Abbildung 5 dargestellt sind: Vorsteuerung (Feedforward), Allokation und Regler (Feedback). In der Vorsteuerung werden aus den kommandierten Größen x_c die Kräfte und Momente H_{ff} berechnet, die für den Prozess nötig sind, um von den aktuellen Zuständen die kommandierten zu erreichen. Die Vorsteuerung entspricht somit der invertierten dynamischen Komponente des Modells. In der Allokation werden diese Kräfte und Momente in die Stellgrößen u umgerechnet, d.h., sie werden so auf die zur Verfügung stehenden Antriebe und Steuerorgane verteilt, dass daraus die gewünschte Bewegung des Fahrzeugs resultiert. Die Allokation kann deshalb direkt aus der statischen Komponente des Geschwindigkeitsmodells abgeleitet werden. Wenn keine Störungen am Prozess auftreten und das zugrundeliegende Modell den Prozess sehr genau abbildet, bedarf es keines Reglers, um die gewünschten Geschwindigkeiten zu erzielen. Da der Regler folglich nur störbedingte Abweichungen verarbeiten muss, kann er eine einfache lineare Struktur aufweisen und ist leicht zu synthetisieren. Außerdem kann der Regler ebenfalls mit einer hybriden Struktur an die jeweiligen Anforderungen des Fahrtregimes sowie die Umgebungsbedingungen adaptiert werden.

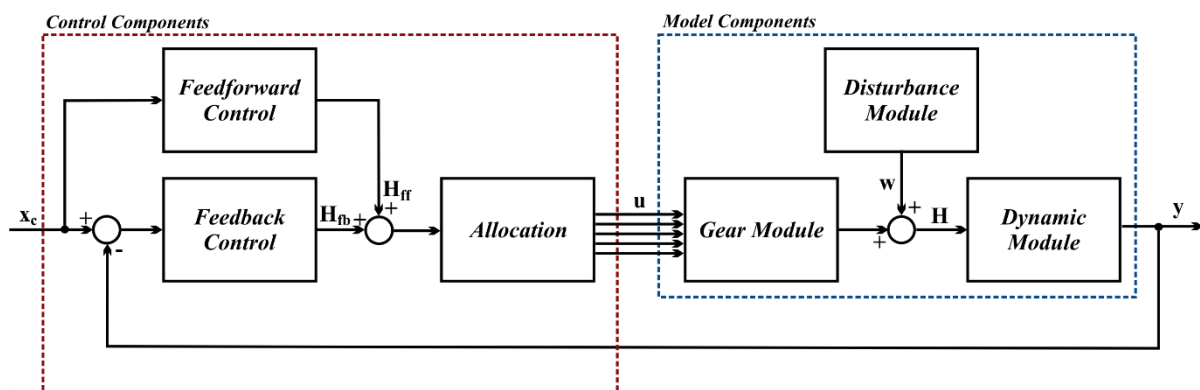


Abbildung 5: Generische Struktur für die planare 3 DOF-Regelung

Für die Allokation für FS Mecklenburg-Vorpommern wurden folgende Prinzipien angewendet: Aus der übergeordneten Struktur wird dem System vorgegeben, ob die Quer- oder die Rotationsbewegung eine höhere Priorität hat. In den meisten Fällen wird das die Rotation sein. Aus dem von der Vorsteuerung berechneten Moment und der aktuellen Längsgeschwindigkeit des Prozesses wird ermittelt, welche Anteile durch die Ruder und den Thruster geleistet werden können. Mit den resultierenden Stellgrößen für diese Stellorgane wird berechnet, welche Differenzkraft sie bei der aktuellen Längsgeschwindigkeit erzeugen. Aus der Summe dieser Differenzkraft und der aus der Vorsteuerung berechneten Kraft in Längsrichtung wird die nötige

Antriebsleistung der Pitch-Propeller abgeleitet. Zur praktischen Integration stellt die Vorsteuerung für das Fährschiff eine Kombination aus Vorhalt- und Verzögerungsstrecke dar. Die Vorhaltzeit entspricht der Verzögerungszeit des Modells. Die Verzögerungszeit, die aus Gründen der Realisierbarkeit ergänzt werden muss, kann in Relation zur Vorhaltzeit variiert werden und kann als Designparameter angesehen werden.

5 Systemvalidierung

In einem ersten Schritt erfolgt die Systemvalidierung am ungestörten Prozess mit einer Bewertung der Ergebnisse von Vorsteuerung und Allokation. Dazu wurde für das Beispiel des Simulatorschiffes Mecklenburg-Vorpommern eine Simulink Real-Time™ Umgebung verwendet, um direkt den Schiffssimulator anzusteuern. Das Simulink®-Modell besteht aus einem Modul zur Generierung des kommandierten Signals \mathbf{x}_c , der Vorsteuerung, der Allokation sowie einem Schnittstelleninterface zum Simulator. Sowohl für die Allokation als auch die Vorsteuerung müssen die aktuellen Werte der Geschwindigkeit vom Simulator bereitgestellt werden. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Validierung anhand eines Manövers, für das Längs- und Rotationsgeschwindigkeit (u und r) kommandiert wurden. Der Verlauf der Geschwindigkeit macht deutlich, dass sich das Schiff bei kleinen Geschwindigkeit um Null im Manöverbetrieb befindet, dann nach Backbord dreht und rückwärts fährt. Da die Applikation des Ruders bei solchen Geschwindigkeiten uneffektiv ist, kommt neben den synchron genutzten Hauptantrieben nur der Thruster zum Einsatz. Im u - und r -Plot sind in Gelb die Ausgangssignale von den Vorsteuerungen für u und r angezeigt, die direkt mit den gemessenen Signalen (Prozess) verglichen werden können. Abweichungen sind insbesondere für die Dynamik von r festzustellen, wenn u das Vorzeichen wechselt, also das Fahrzeug beginnt, rückwärts zu fahren. Durch einen geeigneten Regler können diese geringfügigen Abweichungen reduziert werden.

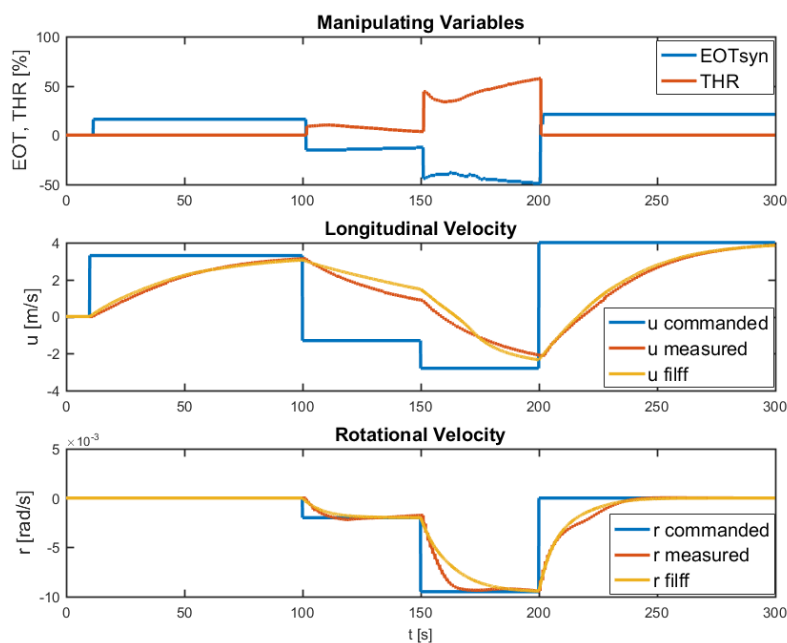


Abbildung 6: Ergebnisse der Vorsteuerung am SHS

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Beitrag stellt ein neuartiges, generisches Regelungskonzept für maritime Fahrzeuge im gesamten Geschwindigkeitsbereich und somit in allen Fahrtregimen vor. Es wird anhand des planaren Prozesses des Simulatorschiffs Mecklenburg-Vorpommern im Einzelnen erläutert. Das Systemkonzept basiert auf einem Modell mit drei Freiheitsgraden, die jeweils modularisiert in einer statischen und einer dynamischen Komponente identifiziert wurden. Die dynamische Komponente entspricht einer Verzögerungsstrecke 1. Ordnung, deren Zeitkonstante nichtlinear aus der aktuellen Geschwindigkeit und der Differenz zur neu kommandierten Geschwindigkeit bestimmt wird. Durch diese stark vereinfachte Struktur ist es einfach möglich, das Modell zu invertieren, um Vorsteuerung und Allokation direkt bedaten zu können. Durch die Prozessnähe der Vorsteuerung kann der Regler mit einer einfachen linearen Struktur realisiert werden, um Störungen auszugleichen. In zukünftigen Entwicklungen soll für den Regler eine hybride Struktur entwickelt werden, die je nach Güteanforderungen und Umgebungsbedingungen umgeschaltet wird.

Literatur

- [1] Fields, C.: *Safety and Shipping 1912-2012*, Allianz Global Corporate & Specialty, Hamburg, 2012.
- [2] Poretta, M., et al.: *GNSS Evolutions for Maritime*, Inside GNSS magazine, Volume 11, Number 3, pp. 54-62, 2016.
- [3] IMO: *Guidelines for vessels with dynamic positioning systems*, Technical Report MSC/Circ.645, International Maritime Organization, 1994.
- [4] CENELEC: *Track control systems*, European Standard EN 62065:2014, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2014.