

Kompensation von Driftstörungen bei der Bahnfolgeregelung von autonomen Fahrzeugen

Erik Rentzow, Universität Rostock, IAT
erik.rentzow@uni-rostock.de

Martin Kurowski, Universität Rostock, IAT
martin.kurowski@uni-rostock.de

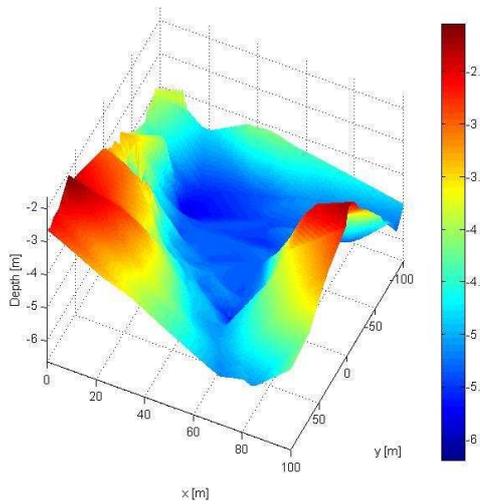
Zusammenfassung

Autonome Über- und Unterwasserfahrzeuge gewinnen in der maritimen Industrie immer mehr an Bedeutung. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von Vermessungen über die Aufspürung und Neutralisation von Kampfmitteln bis zu automatisierten Search-and-Rescue-Prozessen auf See. Für bestimmte Anwendungen muss das autonome Fahrzeug einer vorgegebenen geometrischen Bahn präzise folgen. Dies muss auch unter widrigen Bedingungen, wie z.B. bei Wind oder Meeresströmungen, möglich sein. Werden diese Störungen nicht berücksichtigt, kann eine ungewollte Driftbewegung und dadurch eine Abweichung von der Sollbahn entstehen. Vor diesem Hintergrund wird ein Verfahren zur Reduzierung des Einflusses einer unbekannteren Driftstörung auf die Bahnfolgeregelung von autonomen Wasserfahrzeugen vorgestellt, welches einen Algorithmus zur Schätzung der Driftstörung beinhaltet. Weiterhin wird gezeigt wie diese Schätzung für eine Störgrößenaufschaltung in einem kaskadierten Bahnregelungssystem, bestehend aus Bahnabweichungsregler mit unterlagertem Kursregler, genutzt werden kann.

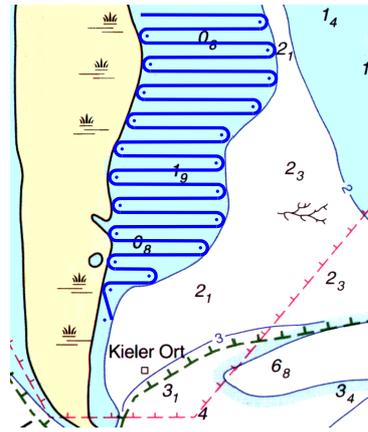
1 Einleitung

Autonome Fahrzeuge gewinnen in der heutigen stark automatisierten Welt immer mehr an Bedeutung. Derartige Über- und Unterwasserfahrzeuge werden bevorzugt für Aufgaben eingesetzt, die mit bemannten Fahrzeugen zu kostenintensiv oder mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden sind. Häufige Anwendungen sind ozeanographische Kartografierungs- und Messaufgaben, wie z.B. die Aufnahme des in Abbildung 1a gezeigten Tiefenprofils.

Das Anwendungsszenario zur automatischen Führung eines Wasserfahrzeuges für Vermessungsaufgaben ist die Bahnfolgeregelung. Das Regelungsziel bei diesem Szenario ist einer fest vorgegebenen geometrischen Bahn, die wie z.B. in Abbildung 1b aussehen kann, zu folgen. Eine Vorgabebahn besteht in der Regel aus Geraden- und Kreisbogenabschnitten. Dabei stellen vor allem die gekrümmten Bahnabschnitte eine besondere Herausforde-



(a) Tiefenprofil der Warnow in der Nähe des Traditionsschiffs im Rostocker Hafen



(b) Beispielhafte Vorgabebahn

Abbildung 1: Tiefenprofil und Vorgabebahn

zung für die Bahnfolgeregelung und die Bahnüberwachung dar. Für einige Anwendungen ist es erforderlich, dass die vorgegebene Bahn möglichst genau abgefahren wird. Bei Untersuchungen in [1] wurde festgestellt, dass sich das Bahnfolgeverhalten unter dem Einfluss von Driftstörungen besonders auf gekrümmten Bahnabschnitten deutlich verschlechtert und nicht hinnehmbare Abweichungen von der Vorgabebahn entstehen.

Um dem Abhilfe zu schaffen, verwendet [2] einen nichtlinearen Regelansatz für ein Oberflächenfahrzeug unter Nutzung von Backstepping und einen Adaptionalgorithmus, der die Strömungssituation einbezieht. [3] nutzt ein integrales *Line of Sight-Guidance*-Verfahren für die Bahnfolgeregelung auf einer geraden Bahn. Im stationären Fall kann die Drift aus dem Wert des im Regler befindlichen Integralanteils berechnet werden. [4] misst die Windstörung und nutzt die Messung für eine Störgrößenaufschaltung.

In diesem Beitrag wird davon ausgegangen, dass keine Sensoren zur Messung der Driftstörungen vorhanden sind. Daher wird die Störung durch einen Störgrößenbeobachter geschätzt. Die Schätzung wird für eine Störgrößenaufschaltung zur Kompensation von Driftstörungen bei der Bahnfolgeregelung von unbemannten Oberflächenfahrzeugen genutzt.

2 Modellierung

Ausgehend von den nichtlinearen Differentialgleichungen für die Bewegung eines starren Körpers in drei Freiheitsgraden wurde eine Linearisierung in verschiedenen Arbeitspunkten der Längsgeschwindigkeit durchgeführt. Unter der Annahme, dass die Längsgeschwindigkeit in diesen Arbeitspunkten konstant ist, wurde das Längsgeschwindigkeitsmodell vom Steuerungsmodell entkoppelt, vgl. [5].

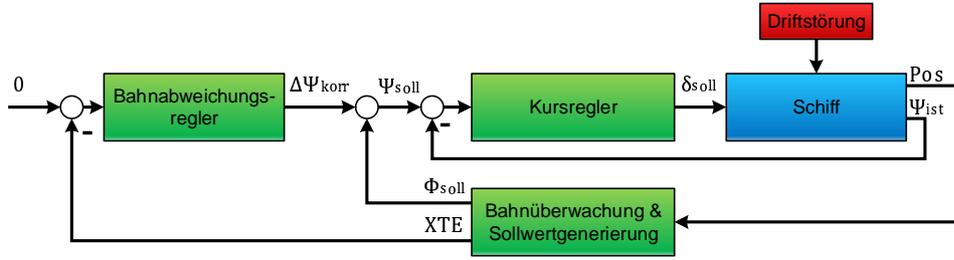


Abbildung 2: Implementiertes Bahnregelungssystem

Das linearisierte Modell lässt sich als Zustandsraum

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\tag{1}$$

mit $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix}^T$ als Zustandsvektor, $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} DZ & \delta \end{bmatrix}^T$ als Eingangsvektor und $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix}^T$ als Ausgangsvektor darstellen. u ist die Längsgeschwindigkeit, v die Quergeschwindigkeit, r entspricht der Drehrate um die Vertikalachse des Fahrzeugs und der Kurs ψ_{ist} wird über die Integration der Drehrate berechnet. Drehzahl und Ruderauslenkung der Antriebe werden durch DZ und δ abgebildet. Die Systemmatrizen sind im Anhang zu finden.

Unter Nutzung dieses Modells wird eine, wie in 2 dargestellte, kaskadierte Bahnregelung verwendet. In diesem Fall besteht das System aus einem Bahnabweichungsregler mit einem unterlagerten Kursregler. Die Führungsgröße des Kursreglers ψ_{soll} entsteht durch Addition der Stellgröße des Bahnreglers $\Delta\psi_{korr}$ und dem Sollbahnwinkel ϕ_{soll} . Die Regel- und Stellgröße des Kursreglers sind der Kurs ψ_{ist} und der Ruderwinkel δ_{soll} . Zur Erzeugung des Korrekturkurses $\Delta\psi_{korr}$ wird in der überlagerten Kaskade der Bahnfehler¹ XTE aus der aktuellen Position des Fahrzeugs durch das Bahnüberwachungssystem berechnet. Das Regelungsziel des Bahnreglers wird dadurch auf eine Minimierung des Betrages des Abstandes zur Sollbahn reduziert, siehe auch [6] und [7].

3 Driftstörungsbehaftetes Bewegungsmodell

Physikalisch ist eine Driftstörung als Kraft anzusehen, die in einer definierten Richtung auf das Schiff wirkt. Diese Kraft wirkt wie ein weiterer Systemeingang über die Einkoppelmatrix \mathbf{E} auf die Systemzustände, wie Abbildung 3) dargestellt.

Die Wirkung dieser Kraft auf die Systemzustände u , v und r wird im körperfesten Bezugssystem betrachtet und abgebildet. Abbildung 4 verdeutlicht die Möglichkeiten zur Beschreibung der Driftstörung im erdfesten Bezugssystem. Sie ist entweder durch Betrag und Richtung (V_c, β_c) oder durch die Komponenten in Richtung der Koordinatenachsen des erdfesten Systems (\dot{x}_c, \dot{y}_c) eindeutig definiert. Um den Einfluss auf die körperfesten Geschwindigkeiten zu erhalten, muss eine Transformation in die körperfesten Störungs-

¹orthogonaler Abstand der aktuellen Fahrzeugposition zur Sollbahn

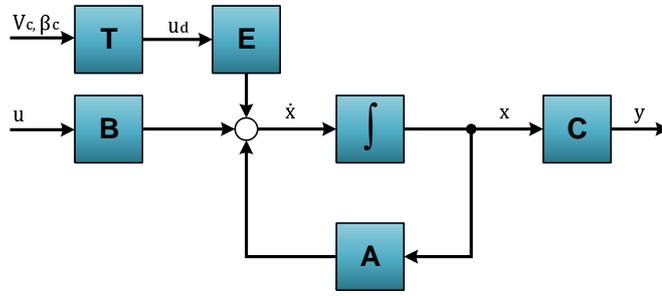


Abbildung 3: Zustandsraummodell des Schiffes mit angreifender Driftstörung

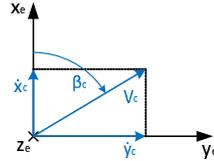


Abbildung 4: Darstellung der Driftstörung im erdfesten Bezugssystem

komponenten vorgenommen werden (in Abbildung 3 als Block **T** dargestellt). Die Transformation bei gegebener Richtung und Betrag erfolgt mit

$$\begin{aligned} u_c &= V_c \cos(\beta_c - \psi_{ist}) \\ v_c &= V_c \sin(\beta_c - \psi_{ist}). \end{aligned} \quad (2)$$

Laut [8] unterliegt die Wirkung der Driftstörung der Dynamik des Fahrzeugs. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug für $t \rightarrow \infty$ auch ohne Krafteinwirkung der Aktoren als Systemeingänge $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ die Geschwindigkeit der körperfesten Driftstörungskomponenten annimmt, muss

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{y}(t) \stackrel{!}{=} \mathbf{u}_d(t) \quad (3)$$

gelten. Unter Anwendung des Endwertsatzes der Laplace-Transformation lässt sich **E** mit

$$\mathbf{E} = -\mathbf{A} \quad (4)$$

ermitteln, [1].

Dieser Modellansatz wurde am nautischen Schiffsführungssimulator *ANS5000* der Firma *Rheinmetall Defence Electronics GmbH* verifiziert, [1]. Auf Basis des driftstörungsbehafteten Bewegungsmodells

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{u}_d \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (5)$$

kann nun ein Beobachter zur Schätzung einer unbekanntenen Driftstörung entworfen werden.

4 Störungsschätzung und -aufschaltung

Die Driftstörung soll mit einem erweiterten Beobachter geschätzt werden. Dieser schätzt sowohl die Zustands- als auch die Störgrößen. Dazu wird das Störmodell

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_d &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}_d \\ \mathbf{z} &= \mathbf{C}_d \mathbf{x}_d\end{aligned}\tag{6}$$

mit $\mathbf{x}_d = \mathbf{z} = [u_c \ v_c \ r_c]^T$ als Zustands- und Ausgangsvektor, \mathbf{A}_d als Systemmatrix benötigt. Dieses Störmodell beschreibt das zeitliche Verhalten der körperfesten Driftstörungskomponenten u_c , v_c und r_c . Die Störung wird im erdfesten Bezugssystem als richtungskonstant ($r_c = 0$) und im Betrag als langsam variierend angenommen ($\ddot{x}_c = \ddot{y}_c \approx 0$). Die körperfesten Störungskomponenten sind durch die Transformationen vom erdfesten ins körperfeste Bezugssystem vom Kurswinkel ψ_{ist} und damit auch von der Drehrate r abhängig. Es ergibt sich

$$\dot{u}_c = v_c \dot{\psi}_{ist} = v_c r\tag{7}$$

$$\dot{v}_c = -u_c \dot{\psi}_{ist} = -u_c r.\tag{8}$$

Aus (7) und (8) resultiert die Systemmatrix

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 0 & r & 0 \\ -r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\tag{9}$$

der Störung und damit der erweiterte Prozess

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{E}\mathbf{C}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_d \end{bmatrix}.\end{aligned}\tag{10}$$

Das erweiterte Modell

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}^* &= \mathbf{A}^* \mathbf{x}^* + \mathbf{B}^* \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}^* \mathbf{x}^*\end{aligned}\tag{11}$$

ist aufgrund der Beziehungen (7) und (8) nichtlinear. Für $\dot{\psi} = r \approx 0$ ist $\mathbf{A}_d = \mathbf{0}$ und das System linear und vollständig beobachtbar. Mit diesem System kann nun der in Abbildung 5 dargestellte Zustands- und Störgrößenbeobachter

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}}^* &= \mathbf{A}^* \hat{\mathbf{x}}^* + \mathbf{B}^* \mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C}^* \hat{\mathbf{x}}^*\end{aligned}\tag{12}$$

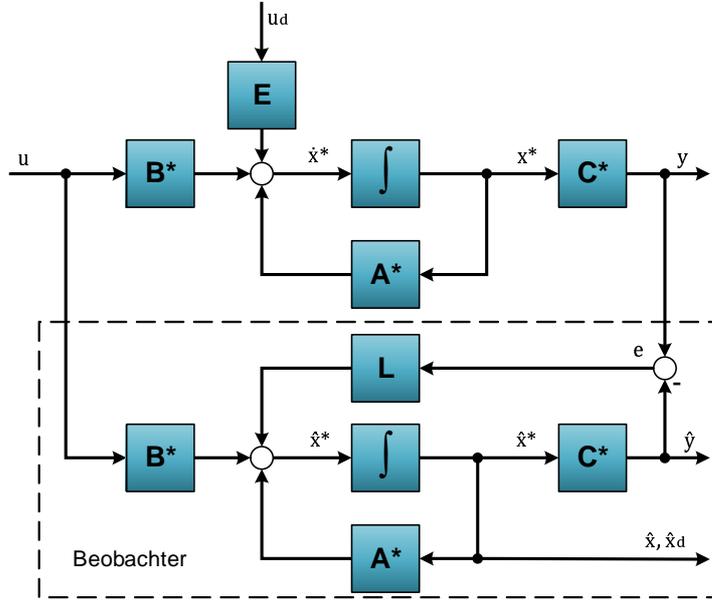


Abbildung 5: Störgrößen- und Zustandsbeobachter

entworfen werden, mit dem die körperfesten Geschwindigkeiten für die drei betrachteten Freiheitsgrade und die ebenfalls körperfesten Störungskomponenten geschätzt werden können. Der Beobachter wurde wie das driftstörungsbehaftete Modell (5) mit Hilfe des Schiffsimulators *ANS5000* verifiziert, [1].

Aufgrund des vereinfachten Störungsmodells mit $\mathbf{A}_d = \mathbf{0}$ kann die Störung nur bei nahezu konstantem Kurswinkel ($r \approx 0$) zuverlässig geschätzt werden. Das ist für diese Anwendung akzeptabel, da die Sollbahnen in der Regel ausreichend lange gerade Bahnabschnitte ($\psi = \text{konstant} \curvearrowright r \approx 0$) enthalten. Die geschätzten Werte aus diesen Abschnitten können dann genutzt werden, um die Bogenfahrt zu verbessern. Das ist möglich, da die erdfeste Störung, wie bereits erwähnt, als richtungskonstant und im Betrag als langsam variierend angenommen wird.

Mit den geschätzten Informationen der Störung wird eine statische Störgrößenaufschaltung realisiert, welche die Drift kompensiert. Die Drift wird durch den Driftwinkel $\Delta\Phi_{drift}$ beschrieben, der aus den geschätzten Störungsgrößen berechnet werden muss. $\Delta\Phi_{drift}$ ist von der quer zur Sollbahn gerichteten Komponente der Driftstörung v_{cB} und der Komponente in Richtung der Sollbahn u_{cB} abhängig, welche mit

$$\begin{aligned} v_{cB} &= V_c \sin(\beta_c - \Phi_{soll}) \\ u_{cB} &= V_c \cos(\beta_c - \Phi_{soll}) \end{aligned} \quad (13)$$

bestimmt werden. Die Berechnung des Driftwinkels erfolgt über die trigonometrische Beziehung

$$\Delta\Phi_{drift} = \arctan\left(\frac{v_{cB}}{U - u_{cB}}\right). \quad (14)$$

Zur Kompensation muss der Winkel

$$\Delta\psi_{ff} = -\Delta\Phi_{drift}. \quad (15)$$

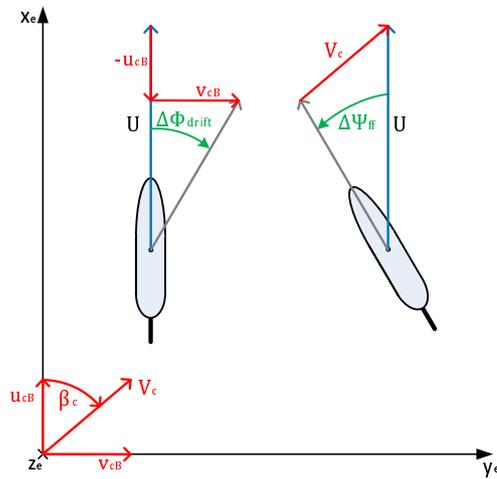


Abbildung 6: Berechnung des Driftwinkels

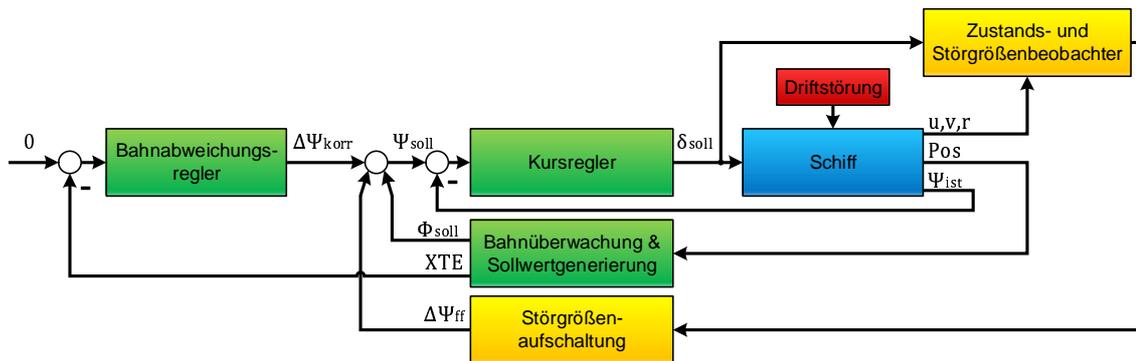


Abbildung 7: Bahnregelung mit Störungsschätzung und Aufschaltung der geschätzten Driftstörung

aufgeschaltet werden. Zur Verdeutlichung der beschriebenen Winkelbeziehungen, sind diese in Abbildung 6 dargestellt.

Die Drift wird also durch eine Änderung des Headings ψ_{soll} (Abbildung 6) durch Addition des Winkels $\Delta\psi_{ff}$ kompensiert. Mit dieser Störgrößen-aufschaltung resultiert die in Abbildung 7 dargestellte Struktur des erweiterten Bahnregelungssystems.

5 Simulationsergebnisse

Die Simulation wurde für den autonomen Vermessungskatamaran *MESSIN* der Universität Rostock durchgeführt, [6]. Als Sollbahn wurde die in der x-y-Ebene von Abbildung 8 blau gestrichelte Bahn gewählt, da sie unterschiedliche Kursänderungsmanöver auf verschiedenen Radien erfordert und sich der Einfluss bzw. die Angriffsrichtung der Driftstörung mehrfach ändert. In dieser Simulation ist das Fahrzeug einer Driftstörung in Richtung 90° ausgesetzt. Auf der z-Achse ist der Betrag des *XTE* über dem Verlauf der Sollbahn in kartesischen Koordinaten dargestellt. Die Störgrößen-aufschaltung ist in Abbildung 8a inaktiv und in Abbildung 8b aktiv. Diesen Abbildungen ist zu entnehmen, dass die Aufschaltung der Driftstörung das Bahnfolgeverhalten deutlich verbessert. Bei aktiver Störgrößen-aufschaltung wird der Betrag des maximalen Bahnfehlers von 3 m

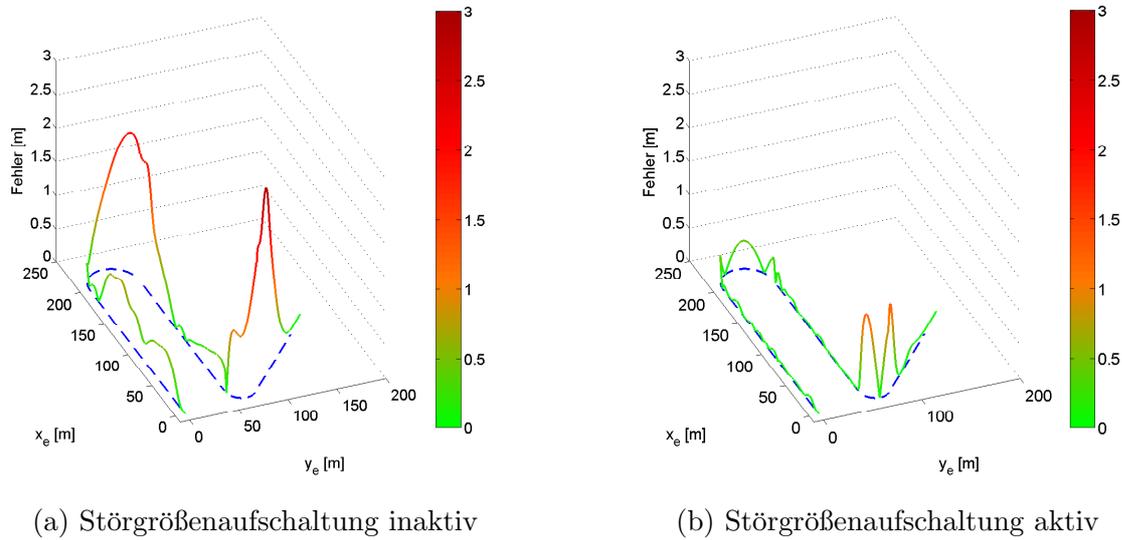


Abbildung 8: Bahnfehler bei inaktiver und aktiver Störgrößenaufschaltung

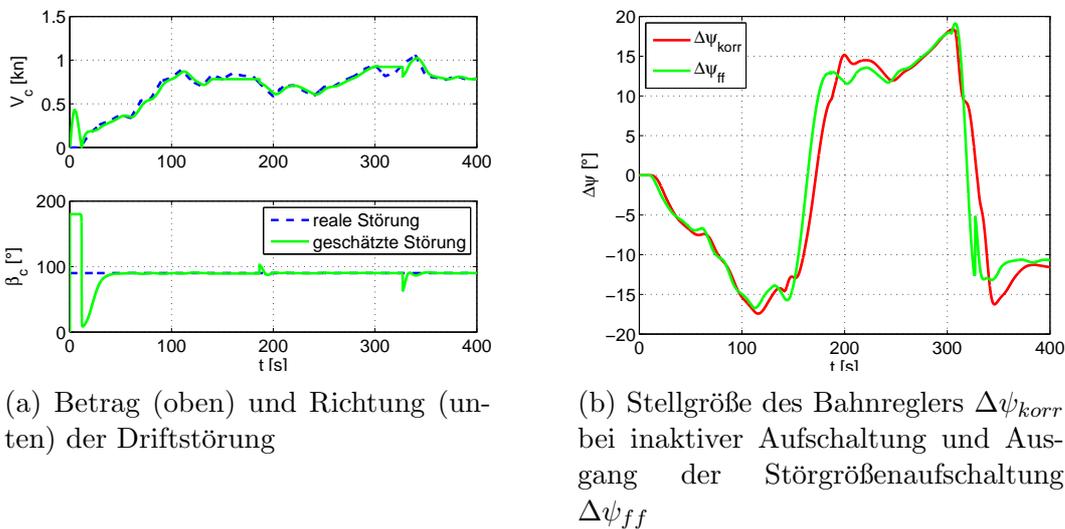


Abbildung 9: Störungsschätzung und Vergleich der Stellgröße des Bahnreglers mit dem Ausgang der Störgrößenaufschaltung

auf 1 m reduziert.

In Abbildung 9a sind die Driftstörung und deren Schätzung dargestellt. Die Schätzung der Störung konvergiert innerhalb der ersten 50 s. Der Störgrößenbeobachter arbeitet zuverlässig über die gesamte Simulationszeit.

Werden der Verlauf des Korrekturkurses $\Delta\psi_{korr}$ bei ausgeschalteter Störgrößenaufschaltung und der aufgeschaltete Kurs bei aktiver Aufschaltung wie in Abbildung 9b verglichen, wird die Wirkung der Störgrößenaufschaltung deutlich. Besonders in der Bogenfahrt (ca. 140 bis 200 s und ca. 300 bis 340 s) zeigt sich der Vorteil des geänderten Systems. Der aufgeschaltete Kurs entspricht, für die stationären Werte auf den geraden Bahnabschnitten, dem Korrekturkurs des Bahnreglers. Die Aufschaltung reagiert jedoch deutlich schneller (bis zu 10 s). Das lässt sich darauf zurückführen, dass die Störgrößenaufschaltung auf die Ursache der Drift, die Driftgeschwindigkeit, reagiert. Der Bahnregler

wird erst bei der Wirkung der Driftstörung (Weg) aktiv. Die Störgrößenaufschaltung erzielt somit die gewünschte Wirkung und entlastet den Bahnregler. Dieser muss daher lediglich geringe Abweichungen ausgleichen.

6 Resümee und Ausblick

Der Beitrag stellt ein Verfahren zur Reduzierung des Einflusses einer unbekanntem Driftstörung auf die Bahnfolgeregelung von autonomen Wasserfahrzeugen vor. Das Verfahren beinhaltet einen Algorithmus zur Schätzung der Driftstörung mit einem Zustands- und Störgrößenbeobachter für ein driftstörungsbehaftetes Bewegungsmodell. Weiterhin wird die Schätzung für eine Störgrößenaufschaltung in einem kaskadierten Bahnregelungssystem, aus Bahnabweichungsregler mit unterlagertem Kursregler genutzt und es werden erste Simulationsergebnisse gezeigt.

Als nächster Schritt wird das erweiterte Bahnregelungssystem in das Navigationssystem des *MESSIN* implementiert und getestet. Darüber hinaus sind weitere Untersuchungen bezüglich der Störungsschätzung während der Bogenfahrt vorzunehmen, um das Bahnfolgeverhalten weiter zu verbessern. Außerdem wird angestrebt das Verfahren mit den im Rahmen des Verbundprojektes SMIS² - *Subsea Monitoring via Intelligent Swarms* entwickelten autonomen Über- und Unterwasserfahrzeugen zu nutzen.

Literatur

- [1] Erik Rentzow. *Beitrag zur automatischen Führung von Wasserfahrzeugen auf gekrümmten Bahnen*. Master thesis, Universität Rostock, Rostock, April 2014.
- [2] Joao Almeida, Carlos Silvestre, and Antonio Pascoal. Path-following control of fully-actuated surface vessels in the presence of ocean currents. In *Control Applications in Marine Systems, Volume # 7 | Part# 1*, pages 26–31, Croatia, 2007. International Federation of Automatic Control.
- [3] Walter Caharija, Mauro Candeloro, Kristin Y. Petterson, and Asgeir J. Sorenson. Relative velocity control and integral LOS for path following of underactuated surface vessels. In *Manoeuvring and Control of Marine Craft, Volume# 9 | Part# 1*, pages 380–385, Italy, 2012. International Federation of Automatic Control.
- [4] Ketan Rasal. *Navigation & Control of an Automated SWATH Surface Vessel for Bathymetric Mapping*. Master thesis, SANTA CLARA UNIVERSITY, 2013.
- [5] Martin Kurowski, Holger Korte, and Bernhard Lampe. AGaPaS - a new approach for search-and-rescue-operations at sea. In *Manoeuvring and Control of Marine Craft, Volume# 9 | Part# 1*, pages 73–78, Italy, 2012. International Federation of Automatic Control.

² Dieses Projekt wird durch das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03SX348 gefördert.

- [6] Jürgen Majohr and Thomas Buch. Modelling, simulation and control of an autonomous surface marine vehicle for surveying applications measuring dolphin MESSIN. In Geoff Roberts and Robert Sutton, editors, *Advances in Unmanned Marine Vehicles*, volume 69 of *IEE Control Series*. Institution of Electrical Engineers, 2006.
- [7] Pramod Maurya, Antonio Pedro Aguiar, and Antonio Pascoal. Marine vehicle path following using inner-outer loop control. In *Manoeuvring and Control of Marine Craft, Volume# | Part#*, pages 38–43, Brazil, 2009.
- [8] Thor I. Fossen. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley, 2011.

Anhang

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$