

Virtuelle Navigation für Binnenschiffe in Fließgewässern

Dipl.-Ing. Alexander Lutz

Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik,
Stuttgart

Dipl.-Ing. Thorsten Dettmann

Bundesanstalt für Wasserbau, Koblenz

Dipl.-Ing. Rolf Zentgraf

Bundesanstalt für Wasserbau, Koblenz

Zusammenfassung

Virtuelle Navigation ermöglicht die Automatisierung der Untersuchung der Befahrbarkeit von Wasserstraßen, indem Leitlinien aus Eigenschaften der Wasserstraßen generiert werden, welchen anschließend mit Hilfe automatischer Bahnführung in der Simulation nachgefahren wird. Dieses Vorgehen eliminiert den menschlichen Faktor in der Bewertung der Befahrbarkeit von Wasserstraßen. Mit derartiger virtueller Navigation können verschiedene mögliche Ausbauvarianten leicht evaluiert und miteinander verglichen werden. Zukünftig kann ein solches System möglicherweise individuelle Leitlinien für die unterschiedlichen Schiffe in einer Art und Weise generieren, dass diese optimal im Sinne eines minimalen Treibstoffverbrauchs sind. Solche Berechnungen könnten Schiffsführern in der Zukunft als Dienst angeboten werden.

Einleitung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist eine technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Deutschland. Die BAW hat ihren Sitz in Karlsruhe. Eine weitere Dienststelle befindet sich in Hamburg. Die BAW ist der zentrale Dienstleister für die Beratung und Unterstützung des Ministeriums und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) im Rahmen ihrer verkehrswasserbaulichen Aufgaben, insbesondere deren bauaufsichtliche Verantwortung dafür, dass alle Anlagen und Einrichtungen der Bundeswasserstraßen den Anforderungen von Sicherheit und Ordnung genügen. Die BAW trägt wesentlich dazu bei, dass die Wasserstraßen in Deutschland den wachsenden technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen gerecht werden. Die BAW verfügt über eine umfassende Kompetenz und Erfahrung auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus und ist maßgeblich an der Weiterentwicklung dieser Disziplin beteiligt.

Im Bereich Wasserbau werden projektbezogene Untersuchungen unter Anwendung von Naturuntersuchungen sowie physikalischen und mathematischen Modellen durchgeführt. Als Ergebnis werden Prognosen als Entscheidungsgrundlagen sowohl für Unterhaltungs- und Ausbauplanungen (z. B. Strombaukonzepte, hydraulisch und morphologisch optimierte Wasserbauwerke, Fahrrinnenabmessungen) als auch für den wirtschaftlichen Betrieb der natürlichen und künstlichen Wasserstraßen bereitgestellt. Eine Aufgabe ist es, im Zuge von Baumaßnahmen an den Wasserstraßen bzw. der Zulassung neuer Schiffsabmessungen vorab zu untersu-

chen, ob die Sicherheit und Leichtigkeit für die Schiffsverkehr weiterhin gewährleistet bleiben.

Schiffsführungssimulator als wasserbauliches Werkzeug

Die Bundesanstalt für Wasserbau setzt für derartige Untersuchungen einen Schiffsführungssimulator ein. Dieser Simulator besteht aus zwei Brücken und einem Instruktorarbeitsplatz (Abbildung 1). Da hier ausschließlich verkehrswasserbauliche Untersuchungen durchgeführt werden und keine Ausbildung für das nautische Personal von Binnenschiffen stattfindet, konnte das Sichtsystem auf drei Monitore reduziert werden. Instrumente, welche den Status des Schiffes anzeigen, werden generisch auf Bildschirmen dargestellt. Dies erhöht die Flexibilität der Anlage, so dass unterschiedlichste Schiffstypen mit unterschiedlichen Antriebssystemen simuliert werden können. Wichtig für Simulationen, bei denen das Schiff durch einen Schiffsführer gesteuert wird, ist, dass die Bedienelemente und das Radargerät originale Instrumente sind. Um den subjektiven Einfluss durch den Menschen bei Bedarf sicher ausschalten zu können, ist zusätzlich vorgesehen, das Schiff durch einen Autopiloten steuern zu lassen. Damit wird sichergestellt, dass durch wiederholtes Fahren kein Lerneffekt beim Menschen die Ergebnisse der Simulation beeinflusst. Unterschiedliche Ausbauvarianten können direkt miteinander objektiv verglichen und bewertet werden.



Abbildung 1: Schiffsführungssimulator der BAW

In Vorbereitung von Untersuchungen mit dem Schiffsführungssimulator werden die entsprechenden Fahrtreviere mit zugehöriger Unterwassertopografie erstellt. Für Simulationsfahrten nach Sicht bzw. Radar werden Objekte wie Bebauung, Vegetation, Fahrrinnenbegrenzungstonnen, Signalstellen etc. dreidimensional modelliert und entsprechend texturiert.

Die flussbauliche Bewertung einschließlich der kurz- und langfristigen morphologischen Entwicklung erfolgt in der BAW unter Anwendung von physikalischen sowie mathematisch-numerischen Modellen, bei denen das Abflussgeschehen in einem Fließgewässer simuliert wird. Dafür entwickelt und betreibt die BAW zweidimensionale hydrodynamisch-numerische (2D-HN-) Modelle, die für unterschiedliche Szenarien hoch aufgelöste Wasserstands- und Abflussströmungsfelder liefern.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Sohldaten aus dem 2D-HN-Modell, welche in der Inland ENC ergänzt und dem Simulator bereitgestellt wurden. Dadurch ist für die Schiffsführungssimulation eine detaillierte Beschreibung

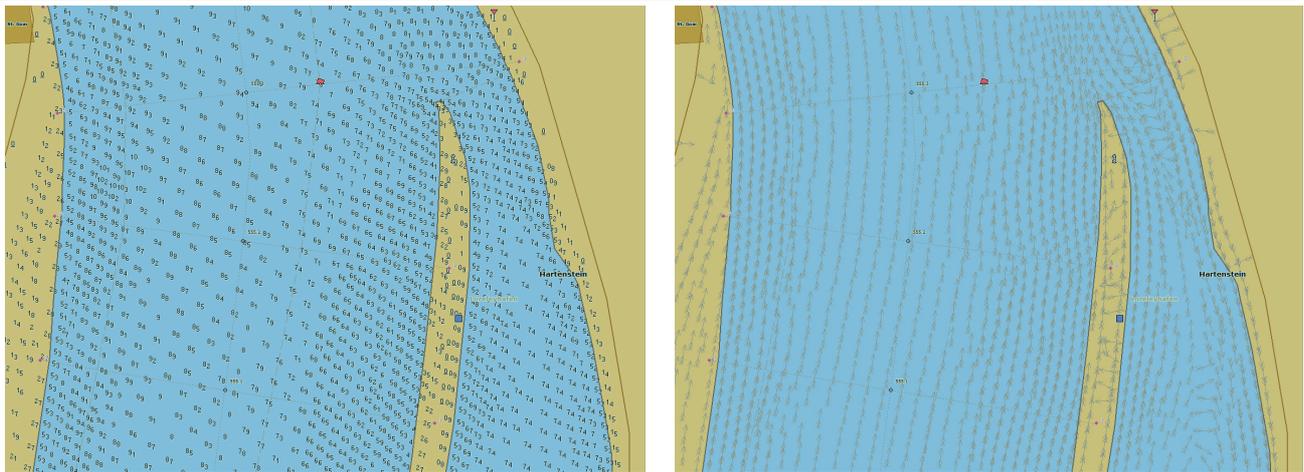


Abbildung 2: Sohldaten und tiefengemittelte Strömungsdaten in der Inland ENC

der Unterwassergeometrie ermöglicht worden. Die tiefengemittelten zweidimensionalen Strömungsfelder aus dem Modell werden ebenfalls in die Inland ENC mittels definierter Objekte integriert.

Für die eigentlichen verkehrswasserbaulichen Untersuchungen werden die Schiffe durch das so aufgebaute Fahrtrevier navigiert. Dies geschieht wie beschrieben mit Schiffsführern, die über die notwendigen Streckenkenntnisse in dem zu untersuchenden Wasserstraßenabschnitt verfügen. Andererseits wird für eine objektive Bewertung das Schiff durch einen virtuellen Schiffsführer gesteuert wird. Die virtuelle Navigation besteht grundsätzlich aus zwei Verfahren. Ein Verfahren ermittelt die Leitlinie, die den optimalen Kurs durch das Gewässer angibt. Das zweite Verfahren ist ein Regelkreislauf, der gewährleistet, dass das Schiff dieser Leitlinie folgt.



Abbildung 3: Querprofil bei Rhein km 551,3 für Pegel Kaub gleich 1,90 m



Abbildung 4: Definition eines Tiefenpotenzials im Flussprofil

Virtuelle Navigation

Bewertung des Flusses mit Hilfe von Befahrbarkeitspotenzialen

In natürlichen Wasserstraßen mit starken Strömungsgeschwindigkeiten müssen die Schiffsführer auf die Strömung und die morphologischen Eigenschaften des Flusses reagieren. Dadurch ist es nicht möglich, eine Leitlinie vorzugeben, ohne die Eigenschaften des Flusses zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Leitlinien unter Berücksichtigung der durch das Fließgewässer vorgegebenen Randbedingungen automatisch konstruiert.

Für die Entwicklung der Leitlinien werden für das Fahrtrevier Befahrungsregeln aufgestellt. Diese beruhen auf Gewässerdaten, Verkehrsvorschriften, Gewohnheiten der örtlichen Schifffahrt und den nautischen Eigenschaften des Schiffes. Im derzeitigen Arbeitsstadium wird der zu untersuchende Flussabschnitt in Querprofile unterteilt. In einem ersten Schritt werden in jedem Querprofil die Bereiche ermittelt, die tief genug sind, damit das Schiff dort fahren kann. Am Beispiel des Querprofiles am Rhein bei km 551,3 am Jungferngrund soll erläutert werden, wie die Beurteilung erfolgt. Gefordert wird eine Mindesttiefe von 1,90 m (Abbildung 3). Die rote Linie markiert die geforderte Mindestwassertiefe.

Dadurch wird der Teil des Flusses ersichtlich, der für das vorgegebene Bemessungsschiff mit dem entsprechenden Tiefgang grundsätzlich befahrbar ist. In einem weiteren Schritt muss ein Verfahren entwickelt werden, welches es ermöglicht, die Wasserstraße hinsichtlich der Befahrbarkeit zu bewerten. Damit unterschiedliche Parameter wie Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Verkehrsregeln etc. einer einheitlichen Bewertung unterzogen werden können, wird der Begriff des Befahrbarkeitspotenzials eingeführt. Als Beispiel wird die in Abbildung 3 dargestellte Wassertiefenverteilung im Querprofil in Befahrbarkeitspotenziale umgewandelt. Zu diesem Zweck werden die Tiefen auf Werte zwischen 0 und 100 normiert. Wassertiefen unter der geforderten Mindesttiefe, im Beispiel unter 1,90 m, erhalten den Potenzialwert 0. Wassertiefen mit der geforderten Mindesttiefe erhalten den Wert 1, und die maximale Tiefe bekommt den Wert 100. Die Umrechnung der Zwischenwerte erfolgt linear. Danach ergibt sich aus dem Querprofil das in Abbildung 4 im oberen Teil dargestellte Tiefenpotenzial.

Mit Hilfe dieses Tiefenpotenzials kann die Befahrbarkeit eines Querprofiles schon sehr einfach bewertet werden. Bereiche mit dem Wert 0 sind nicht befahrbar. Mit wachsender Wassertiefe wird der Schiffswiderstand kleiner. Das bedeutet, je größer der Wert des Tiefenpotenzials ist, umso besser ist das Profil in diesem Bereich befahrbar.

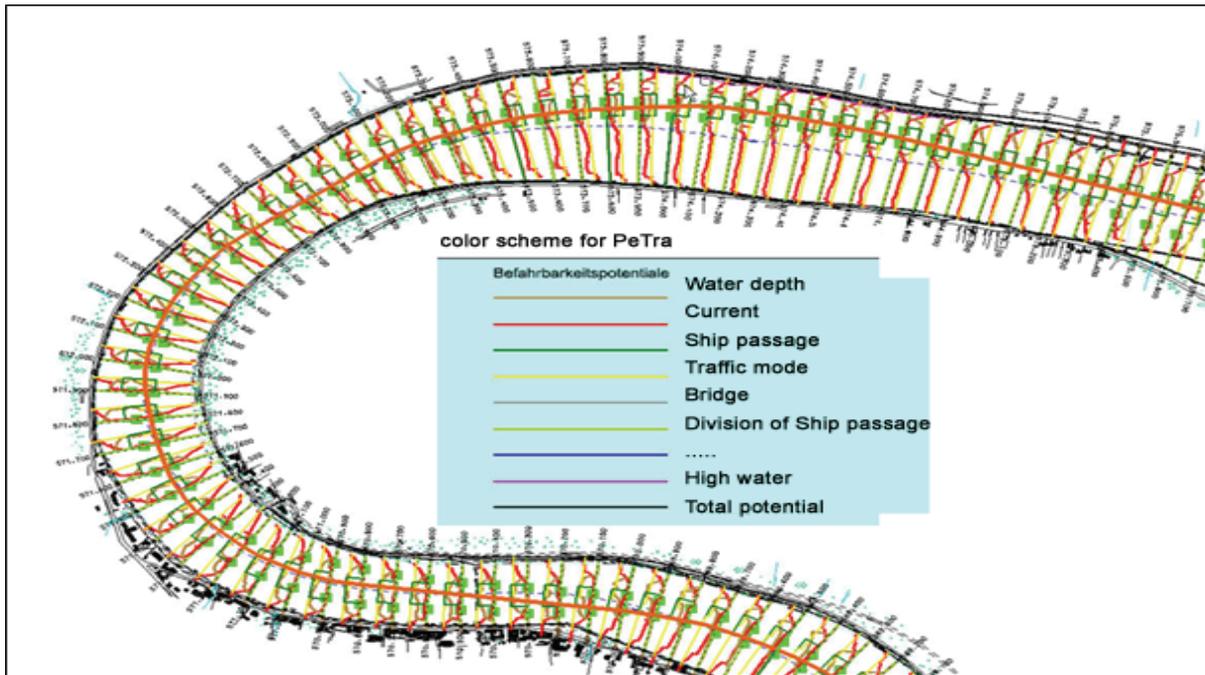


Abbildung 5: Profilpotenziale entlang des Rheins zwischen Rh km 569 bis Rh km 575

Nach dem gleichen Prinzip wird die Fließgeschwindigkeitsverteilung innerhalb des Flussprofils bewertet. Allerdings wird hier unterschieden, ob das Schiff zu Berg oder zu Tal fährt. Auch hier werden die Fließgeschwindigkeiten in Potenzialwerte zwischen 1 und 100 linear umgerechnet. Der Wert 0 wird an Fließgeschwindigkeiten vergeben, die so groß sind, dass ein Schiff diesen Bereich des Profils nicht befahren kann. Fährt das Schiff zu Berg, so wird es immer die Strömungsbereiche meiden, in denen es gegen hohe Fließgeschwindigkeiten fahren muss. Aus diesem Grund erhalten die maximalen Fließgeschwindigkeiten für den Bergfahrer den Wert 1 und die minimalen Fließgeschwindigkeiten den Wert 100. Für den Talfahrer erfolgt die Bewertung genau umgekehrt. Maximale Fließgeschwindigkeiten bekommen den Wert 100 zugewiesen und die minimalen Fließgeschwindigkeiten den Wert 1.

Allgemein gilt: Ein Potenzial ist die Bewertung des Befahrbarkeitszustands eines Profilstreifens hinsichtlich eines Parameters auf einer Skala von 0 bis 100. Dazu werden zunächst die minimale und die maximale Größe des Parameters auf dem gesamten Profilschnitt ermittelt. Sofern ein großer Parameterwert als optimal angesehen wird, entspricht das Maximum einem Potenzial von 100. Andernfalls wird dem größten Parameterwert das kleinste Potenzial 1 zugeordnet. Nur dann, wenn ein Profilbereich bei Überschreitung eines Parametergrenzwertes als nicht befahrbar gelten soll, wird das Potenzialminimum 0 verwendet.

Nach diesen Kriterien lassen sich weitere Potenziale erstellen. Das ist z. B. das Vorhandensein einer Fahrrinne und der Zwang, innerhalb der Fahrrinne fahren zu müssen.

Für eine Modellierung des Flusses Rhein wurden folgende Potenziale verwendet:

- Wassertiefenverteilung
- Strömungsverteilung

- Vorhandensein und Nutzungsvorgabe einer Fahrrinne
- Verkehrsmodus (z. B. Vorgabe eines Rechtsverkehrs)
- Brückendurchfahrtsregeln
- Vorhandensein von Fahrinnenteilungen mit entsprechenden verkehrlichen Vorgaben
- Vorgabe zur Nutzung der blauen Tafel (Begegnung Stb/Stb)
- Sonderregeln, die z. B. nur bei Hochwasser am Rhein gelten

Alle genannten Parameter werden in Potenziale überführt und müssen über das Querprofil verteilt als Streifeninformation vorliegen. Die Normierung der Parameterwerte der einzelnen Streifen auf einer Skala von 0 bis 100 ermöglicht eine Bewertung der Befahrbarkeit der Profilabschnitte hinsichtlich dieses Parameters. Gleichzeitig gestattet sie den Vergleich und die Überlagerung der Potenzialverläufe verschiedener Parameter, so dass eine Gesamtbewertung der Befahrbarkeit jedes Querprofils möglich sind. Die Potenzialregeln werden entlang des zu untersuchenden Flusses für jedes Querprofil aufgestellt. Ein Beispiel für den Rhein zwischen Rh Km 569 und Rh km 575 ist in Abbildung 5 dargestellt.

Für eine Gesamtbewertung wird eine Gewichtung der einzelnen Potenziale eingeführt. Mit dieser Gewichtung wird es möglich, die Bedeutung einzelner Potenziale hervorzuheben oder abzumindern. So ist z. B. die Wassertiefe für ein Containerschiff, welches in der Regel mit geringem Tiefgang fährt, weniger von Bedeutung als für ein Schiff, welches mit seinem Tiefgang die maximalen Möglichkeiten des Gewässers ausnutzt. Die Summe der einzelnen Potenziale unter Berücksichtigung der Gewichtung jedes Gewässerparameters ergibt dann für jeden Profilbereich die zur Bewertung verwendete Potenzialsomme.

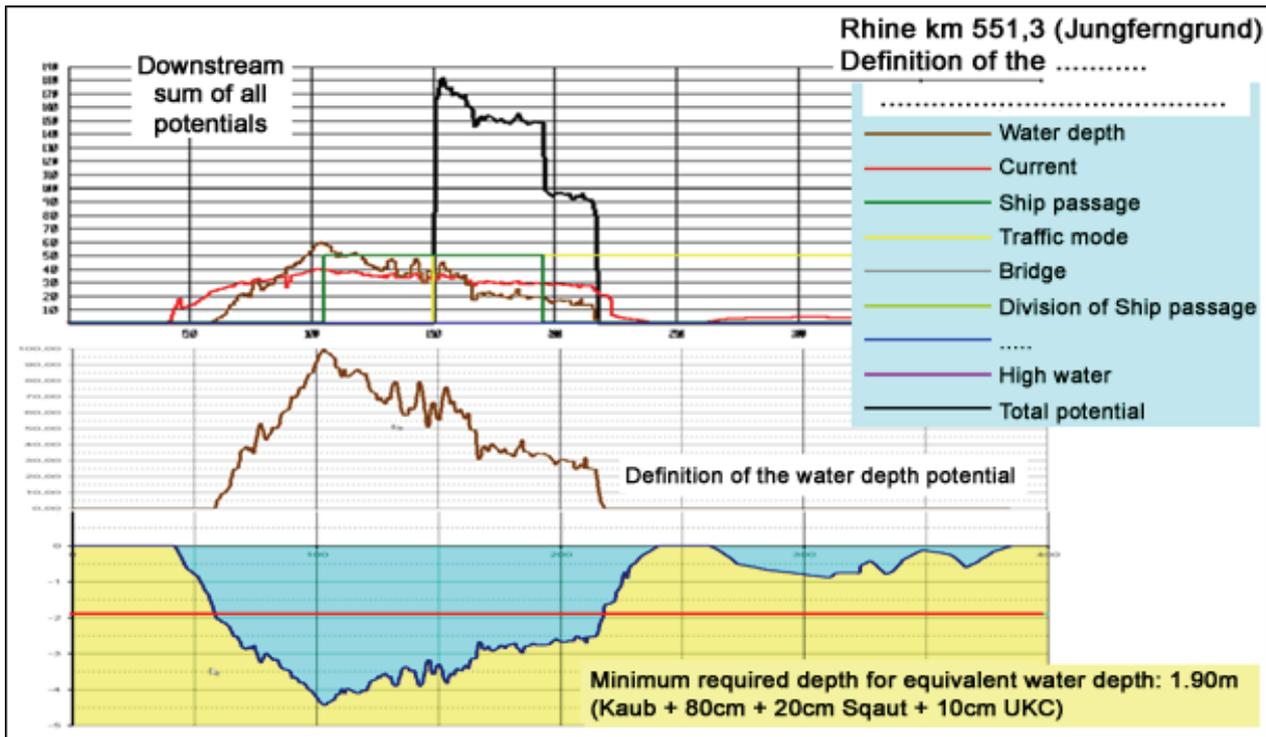


Abbildung 6: Zusammenfassung aller Potenziale am Beispiel Rhein km 551,3

Am Beispiel des eingangs aufgezeigten Querprofils bei Rh km 551,3 kann man die Entstehung eines Befahrbarkeitspotenzials sehen (Abbildung 6). Ausgangspotenzial war die Bewertung der Wassertiefe (in der unteren Bildhälfte braun dargestellt). Weitere Potenziale sind die Nutzung der Fahrrinne (grün), die Strömungsverteilung als Ziel für den Talfahrer (rot) und der Verkehrsmodus für die vorgeschriebene Nutzung der rechten Fahrrinnenhälfte.

Sind die Potenziale für die Querprofile des zu untersuchenden Fließgewässers aufgestellt, erfolgt eine Abschätzung der zu erwartenden Fahrspurbreite des Schiffes. In diese Abschätzung gehen die Schiffsabmessungen, der Kurvenradius des Gewässers und die fahrdynamischen Eigenschaften des Schiffes ein. Mit diesen Fahrspurbreiten werden für jedes Profil die Durchfahrtsbreiten mit dem höchsten Befahrbarkeitspotenzial ermittelt. Im Ergebnis entsteht eine Folge von Durchfahrtstoren, auf deren Grundlage eine Leitlinie für einen Schiffstyp konstruiert werden kann. Diese Leitlinie ist für einen bestimmten Abfluss und ein bestimmtes Schiff gültig.

Entwicklung von Leitlinien

Der Profillbereich mit dem höchsten Befahrbarkeitspotenzial gilt als optimal befahrbar und wird nachfolgend als "Passagetor" bzw. "Tor" bezeichnet, das von der Leitlinie durchlaufen werden sollte. Sofern es auf einem oder mehreren Profilen Bereiche mit ähnlich hoher Potenzialsomme gibt (Toleranzbereich für gleichwertige Potenziale ist definierbar), entstehen auf diesen Profilschnitten mehrere gleichwertige Tore und damit eine Vielzahl möglicher Leitlinienverläufe, aus denen jene Torfolge mit dem kürzesten Weg ermittelt wird. Der Durchstoßpunkt der Kursachse durch das letztendlich pro Profilschnitt ausgewählte Tor wird so

gelegt, dass das Schiff beim Durchfahren aller Tore einen möglichst kurzen Weg mit geringen Richtungswechseln zurücklegt (Abbildung 7).

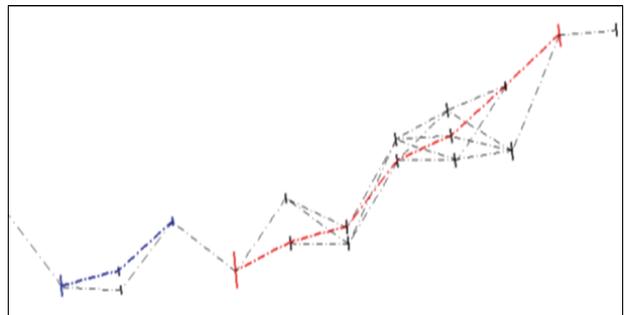


Abbildung 7: Auswahl geeigneter Passagetore anhand der kürzesten Route

In einem letzten, komplexen Berechnungsalgorithmus wird versucht, die Durchstoßpunkte aller Tore so durch eine Folge von Geraden und Kreisbögen zu verbinden, dass eine Modell-Leitlinie mit tangentialen Übergängen zwischen den Geraden und Kreisbögen entsteht, die möglichst alle Tore durchläuft.

Für diese Berechnungen wird ein Mindestradius von einer Schiffslänge vorgegeben. Um bei den Elementen der Leitlinie eine Bogenlänge größer als 0 zu garantieren, resultiert ein maximaler Radius. Da sich die Größen der Bogenradien gemäß vorgegebenem Mindestradius und des errechneten maximalen Radius nur in diesem vorgegebenen Bereich bewegen können, ist es nicht immer möglich, alle Tore unter Einhaltung aller Bedingungen zu passieren. Ist die Einbeziehung eines Passagetores in die Leitlinie nicht möglich, kann es zumindest in seiner berechneten Größe nicht beachtet werden. Um die Fahrrinne im Profilschnitt trotzdem zu berücksichtigen, wird es deshalb auf die

volle Fahrinnen- bzw. Fahrwasserbreite erweitert. Als Folge müssen die Durchstoßpunkte der Leitlinie durch diese und seine Nachbarore angepasst werden, was wiederum eine Neuberechnung der Bogenradien durch diese und weitere benachbarte Tore erfordert. Auch dieser Vorgang erfordert eine Neuberechnung von Durchstoßpunkten und Bogenradien. Die Berechnung der Leitlinie läuft deshalb in einem iterativen Prozess ab, in dem mehrere Teilberechnungen erfolgen. Erfordert das Ergebnis einer Teilberechnung die Änderung der Anzahl oder der Position eines Durchstoßpunktes, wird der Gesamtprozess erneut durchlaufen. Das geschieht so oft, bis Anzahl und Position der Punkte konstant bleiben und eine Verbindung der Punktfolge durch Bögen und gemeinsamen Tangenten zur Leitlinie möglich ist.

Folgende Berechnungsschritte werden in dieser Iteration ausgeführt:

1. Berechnung der Folge von Durchstoßpunkten durch die Tore
2. Ggf. Eliminierung kollinearere Tore (Tore, deren Durchstoßpunkte mit minimaler Abweichung auf der Verbindung Vorgänger-Nachfolgekpunkt liegen)
3. Ermittlung der Tore, bei denen ein Fahrtrichtungswechsel stattfindet (Vorzeichenänderung der Bogenradien)
4. Berechnung der Bogenradien und ggf. Verbreiterung einzelner Tore
5. Testberechnung der Kursachse (lassen sich alle Bögen durch Tangenten verbinden) und ggf. Eliminierung von Toren

Nach diesen Berechnungen werden solche aufeinander folgende Durchstoßpunkte gesucht, die sich auf einem einzigen Kursachsen-Kreisbogen darstellen lassen. Dazu wird für jeden Kreisbogen durch ein Tor geprüft, ob und wie viele unmittelbar nachfolgende Tore (mit gleichem Bogenradiusvorzeichen) er so schneidet, dass sich der Schnittpunkt jeweils mindestens eine halbe Schiffsbreite von der Torbegrenzung entfernt befindet. Der Bereich der Kursachse durch diese aufeinander folgenden Tore wird dann von einem einzigen Kreisbogen gebildet. Im Anschluss muss die an diesen Kreisbogen anschließende Tangente zum nachfolgenden Bogen erneut berechnet werden.

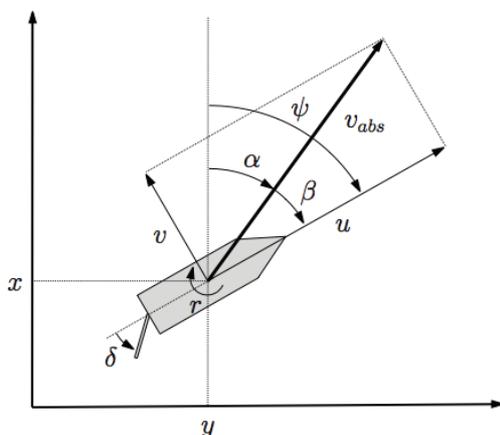


Abbildung 8: Koordinatensystem für mathematische Modelle.

Automatische Bahnführung

Die automatisch generierte Leitlinie dient als Referenzbahn für ein automatisches Bahnführungssystem. Dieses Regelungssystem ist in seiner Standardvariante in der Lage, den Querabstand des Schwerpunkts des Schiffes zur Leitlinie unter Zuhilfenahme des Ruderwinkels als einziger Stellgröße zu minimieren. Dieses automatische Bahnführungssystem kann also für Untersuchungen unter normalen navigatorischen Bedingungen eingesetzt werden, bei denen nur der Ruderwinkel als einziger Eingang verwendet wird. Umgebungseinflüsse wie Wind und Strömung werden als externe Störungsgrößen behandelt. Bei Kenntnis dieser Größen ist es möglich, die Regelgüte erheblich zu verbessern, indem diese explizit berücksichtigt werden.

Dieser Single-Input-Single-Output-Regler kann für den Fall mehrerer Ein- und Ausgänge erweitert werden. Damit werden Spezialmanöver wie Schleuseneinfahrt oder Navigation in stark begrenzten Fahrwassern ermöglicht. Zusätzlich zum Querabstand zur Leitlinie wird für diese Fälle der Driftwinkel des Schiffes minimiert. Das bedeutet, dass die Längsachse des Schiffes tangential zur Leitlinie gehalten wird. Um das zu erreichen, wird das Bugstrahlruder als weiterer Eingang verwendet.

Beide Regler bestehen aus einem Vorsteuerungsanteil (feed-forward) und einer Rückführung (feed-back), vgl. Abbildung 9. Der Vorsteuerungsanteil berechnet sich aus einem inversen mathematischen Modell der Schiffsdynamik. Dieses mathematische Modell wird ebenfalls verwendet für die Berechnung der Rückführung in Form eines Riccati-Reglers. Im Folgenden werden zunächst die verwendeten mathematische Modelle des dynamischen Verhaltens des Schiffes eingeführt. In einem zweiten Schritt werden die Vorsteuerungsanteile aus Größen der Referenzbahn mit Hilfe dieser Modelle hergeleitet. Die Berechnung der Rückführung schließt das Kapitel zur automatischen Bahnführung ab.

- x ... Position in northern direction in m
- y ... Position in eastern direction in m
- u ... Longitudinal velocity in m/s
- v ... Lateral velocity in m/s
- v_{abs} ... Absolute velocity in m/s
- δ ... Rudder angle in rad
- r ... Rate of turn in rad/s
- ψ ... Heading in rad
- α ... Course over ground in rad
- β ... Drift angle in rad

Mathematische Modelle

Für den Standardfall wird ein Modell mit zwei Freiheitsgraden in der Ebene verwendet, vgl. Figure 8. Die Rotationsdynamik um die Hochachse des Schiffes wird als Verzögerungsglied erster Ordnung der Drehrate r mit der Zeitkonstante T_r und der Verstärkung K_r , sowie dem Ruderwinkel δ als einzigem Eingang modelliert, vgl. (Nomoto, Taguchi, Honda, & Hirano, 1957).

$$\begin{aligned}\dot{r} &= -\frac{1}{T_r} r + \frac{K_r}{T_r} \delta, \\ \dot{\psi} &= r, \\ \dot{\beta} &= -\frac{1}{L'_\beta} v_{abs} \beta + K_\beta r, \\ \dot{x} &= v_{abs} \cos(\psi - \beta), \\ \dot{y} &= v_{abs} \sin(\psi - \beta).\end{aligned}$$

Der Driftwinkel β , welcher sich ergibt als der Winkel zwischen der Schiffslängsachse und seines Kurses, wird zur Modellierung der Querdynamik des Schiffes eingesetzt. Die Längsdynamik des Schiffes wird als stationär betrachtet. Diese Annahme ist gültig, weil sich die Längsgeschwindigkeit des Schiffes u nur langsam verändert im Vergleich zur Drehrate des Schiffes r sowie seiner Quergeschwindigkeit v . Die Differentialgleichungen für die anderen Zustände ψ , x und y ergeben sich direkt aus der Kinematik. Die Parameter des Modells T_r , K_r , L'_β und K_β werden mit Hilfe von Methoden der Parameteridentifikation aus Messfahrten mit Großschiffen berechnet.

Vorsteuerung

Unter der Annahme eines perfekten Modells des Schiffes hält der Ruderwinkel der Vorsteuerung das Schiff auf der Leitlinie, sofern keine Störungen vorhanden sind. Er kann durch Modellinversion berechnet werden. Der Winkel der Vorsteuerung δ_{ff} ist eine Funktion von Eigenschaften aus der Leitlinie. Wird die Gleichung der Drehgeschwindigkeit invertiert, so ergibt sich

$$\delta_{ff} = \frac{1}{K_r} r_s + \frac{T_r}{K_r} \dot{r}_s.$$

Die Drehgeschwindigkeit r und ihre Zeitableitung auf der rechten Seite der Gleichung werden mit einem Index s versehen, um zu verdeutlichen, dass es sich hierbei um Sollgrößen handelt, welche aus der Leitlinie berechnet werden können. Aus der dritten Gleichung (β -Dynamik) kann die folgende Gleichung für die Soll-drehgeschwindigkeit r_s unter Zuhilfenahme der Zeitableitung der kinematischen Gleichung $\psi_s = \alpha_s + \beta_s$ hergeleitet werden:

$$r_s = -\frac{1}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{1 - K_\beta} \beta_s + \frac{1}{1 - K_\beta} \dot{\alpha}_s$$

Die Zeitableitung dieser Gleichung zusammen mit der β -Gleichung von oben ergibt

$$\dot{r}_s = \left(\frac{1}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{1 - K_\beta} \right)^2 \beta_s - \frac{K_\beta}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{(1 - K_\beta)^2} \dot{\alpha}_s + \frac{1}{1 - K_\beta} \ddot{\alpha}_s$$

$\dot{\alpha}_s$ und $\ddot{\alpha}_s$ können direkt aus der Leitlinie berechnet werden. α bezeichnet hierbei den Sollkurs des Schiffes, welcher identisch ist zur Richtung der Tangente an die Leitlinie. Seine erste und zweite Zeitableitung ergeben sich aus der Krümmung der Leitlinie κ wie folgt:

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_s(t) &= v_{abs} \kappa_s(s) \\ \ddot{\alpha}_s(t) &= v_{abs}^2 \kappa'_s(s)\end{aligned}$$

Der verbleibende Sollwert des Driftwinkels β_s wird aus der dritten Gleichung wiederum zusammen mit der kinematischen Gleichung für die Winkel $\psi_s = \alpha_s + \beta_s$ hergeleitet:

$$\dot{\beta}_s = -\frac{1}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{1 - K_\beta} \beta_s + \frac{K_\beta}{1 - K_\beta} \dot{\alpha}_s$$

Hierbei handelt es sich um eine stabile Differentialgleichung für den Driftwinkel β mit der Zeitableitung der Richtung der Leitlinie als Eingang. Diese kann online mit Hilfe der Krümmung der Leitlinie integriert werden. Die drei Gleichungen für r_s , \dot{r}_s und $\dot{\beta}_s$ werden in die Gleichung für δ_{ff} eingesetzt. Der Vorsteuerungsanteil des Ruderwinkels kann also damit ausschließlich aus Parametern der Leitlinie berechnet werden.

Rückführung

Der Vorsteuerungsanteil des Ruderwinkels ist in der Lage, das Schiff auf der Referenzbahn zu halten, solange keine Störungen vorhanden sind und unter der Annahme eines perfekten dynamischen Modells. Der Schiffsführungssimulator verwendet jedoch ein wesentlich detaillierteres Modell mit sechs Freiheitsgraden. Um damit gültige Vorhersagen zu generieren, werden Wind und Strömung ebenfalls simuliert. Das bedeutet, dass eine Rückführung nötig ist, um Abweichungen zu kompensieren, die durch Modellungenauigkeiten und vernachlässigten umweltbedingten Störgrößen hervorgerufen werden. In dieser Arbeit wird ein unbeschränkter Riccati-Regler verwendet. Die resultierende Rückführung minimiert das Kostenfunktional

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (\tilde{x}^T Q \tilde{x} + u^T R u) dt$$

mit $\tilde{x} = x - x_s$. Der Zustandsvektor x besteht aus dem Nordwinkel (Heading), dem Kurs, der Drehgeschwindigkeit um die Hochachse, dem Abstand zur Leitlinie sowie dem integrierten Abstand zur Leitlinie. Der Eingang u enthält ausschließlich den Ruderwinkel δ . In Abbildung 9 ist die gesamte Reglerstruktur dargestellt.

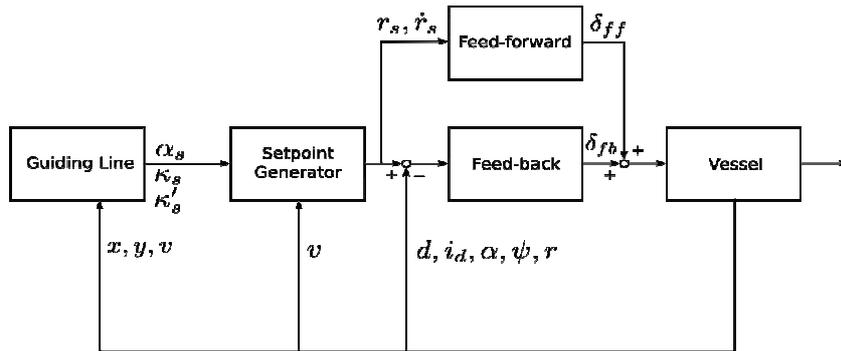


Abbildung 9: Reglerstruktur der automatischen Bahnführung: Vorsteuerung und Rückführung.

Manöverregelung

Der oben eingeführte Regler zur automatischen Führung von Binnenschiffen entlang Leitlinien verwendet nur den Ruderwinkel als Eingang und ist daher auch nur in der Lage, den Schwerpunkt des Schiffes auf der Leitlinie zu halten. Für spezielle Manöver wie Schleuseneinfahrten oder Fahrten in stark begrenzten Fahrwassern dient das Bugstrahlruder als weitere Stellgröße. Im Folgenden werden hierfür das Modell und der Sollwertgenerator vorgestellt.

Ergebnisse

Abbildung 10 zeigt ein Bildschirmfoto des elektronischen Kartensystems des Simulators mit der MS Vigilia, einem 135 m Motorgüterschiff, auf dem Rhein. Das Simulationsmodell besitzt sechs Freiheitsgrade. Seine Parameter wurden mit Hilfe von Parameteridentifikation gewonnen, bei der die Parameter solange verändert werden, bis das simulierte Schiffsverhalten mit dem Verhalten aus zuvor aufgenommenen Messdaten übereinstimmt. Der Simulator berücksichtigt außerdem das Vektorfeld der Flussströmung sowie Kräfte und Momente, die von Wind verursacht werden. Die Simulation erfolgt in Echtzeit. Die Hardware-Schnittstelle zwischen Simulator und Regelungssystem entspricht derjenigen auf realen Schiffen. Wie bereits erwähnt ist das Regelungssystem mit dem Ruderwinkel als einzigem Eingang in der Lage, den Schwerpunkt des Schiffes auf der vorgegebenen Leitlinie zu halten. Der resultierende Driftwinkel hängt von der Geschwindigkeit des Schiffes sowie von der Krümmung der Leitlinie ab. Im Gegensatz zu seither verwendeten Methoden zur Bestimmung der benötigten Fahrspurbreite sind bei der hier vorgestellten Simulation in Kombination mit einem Regelungssystem zur automatischen Bahnführung keine Annahmen über die Stationarität von dynamischen Modellzuständen nötig.

Typische Werte für den sich ergebenden Abstand zur Leitlinie finden sich in Abbildung 11. Die Regelgüte hängt dabei von der Größe der Störungen sowie der Modellunsicherheiten ab. Die Standardabweichung des Abstands zur Referenzbahn beträgt unter normalen Bedingungen weniger als 2 m.



Abbildung 10: Automatische Bahnführung mit dem nötigen Driftwinkel β

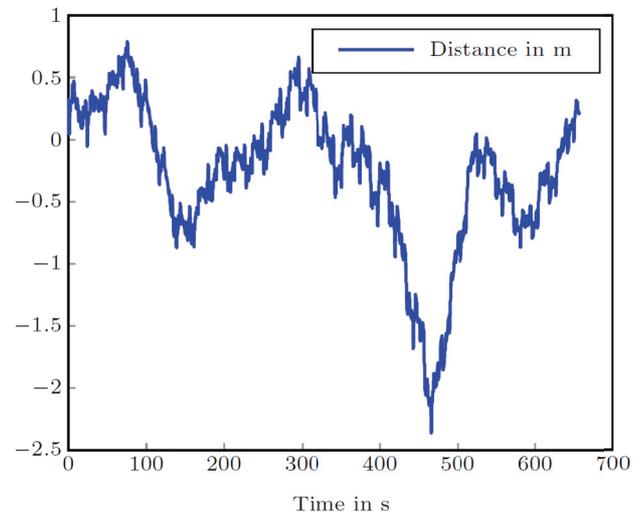


Abbildung 11: Typische Abweichungen von der Leitlinie für das automatische Bahnführungssystem bei rigorosem Simulationsmodell mit Störungen

Mathematisches Modell

Das Modell für die Manöverregelung basiert auf einem 3-Freiheitsgrade-Modell aus (Fossen, 2011). Im Gegensatz zu obigem Modell wird anstatt des Driftwinkels β die Quergeschwindigkeit v zur Modellierung der Querdynamik verwendet. Das vollständige u, v -Modell lautet:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{m - X_{\dot{u}}} [mvr - Y_{\dot{v}}v_r r + X'] \\ \dot{v} &= \frac{1}{m - Y_{\dot{v}}} [-mur + X_{\dot{u}}u_r r + Y'] \\ \dot{r} &= \frac{1}{I_z - N_{\dot{r}}} [(Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}})u_r v_r + N'] \\ \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned}$$

Die hydrodynamischen Kräfte und Momente werden als lineare und quadratische Dämpfungsterme wie in (Blanke, 1981) modelliert:

$$\begin{aligned} X' &= X_u u_r + X_{|u|u} |u_r| u_r + X'' \\ Y' &= Y_v v_r + Y_{|v|v} |v_r| v_r + Y_{|v|r} |v_r| r + Y'' \\ N' &= N_r r + N_{|v|v} |v_r| v_r + N_{|v|r} |v_r| r + N'' \end{aligned}$$

- m ... Mass in kg
- I_z ... Mass moment of inertia in kgm^2
- $X_{\dot{u}}$... Added mass term in x in kg
- $Y_{\dot{v}}$... Added mass term in y in kg
- $N_{\dot{r}}$... Added mass term about vertical axis in kgm^2
- X' ... Hydrodynamic forces in x in N
- Y' ... Hydrodynamic forces in y in N
- N' ... Hydrodynamic moments about vertical axis in Nm

Die neu eingeführten Parameter sind alle konstant und werden typischerweise wiederum aus Messdaten von Testfahrten mit Hilfe von Parameteridentifikation erzeugt. Die Terme der sogenannten Added Mass können auch aus potentialtheoretischen Berechnungen auf Basis von Geometriedaten des Schiffes gewonnen werden, vgl. hierzu (Newman, 1977). Die Kräfte und Momente aufgrund der Stellgrößen werden X'' , Y'' and N'' bezeichnet. Der Index r steht für Werte relativ zum Wasser. Der Einfachheit halber wird hier auf Strömung verzichtet, so dass der Index weggelassen werden kann.

Vorsteuerung

Um diejenigen Stellgrößen zu berechnen, die bei idealem Modell und unter Vernachlässigung der Störungen das Schiff auf seiner Sollbahn mit verschwindendem Driftwinkel halten, wird wiederum das mathematische Modell invertiert. Die sich ergebenden Gleichungen zeigen die Kräfte und Momente der Aktuatoren als Funktionen von Leitlinienparametern wie Richtung, Krümmung sowie Ableitungen davon. Werden die Gleichungen nach diesen Kräfte und Momente aufgelöst, erhält man mit dem Index s zur Bezeichnung von Sollgrößen:

$$\begin{aligned} X_s'' &= (m - X_{\dot{u}}) \dot{u}_s - m v_s r_s + Y_{\dot{v}} v_s r_s - X_u u_s - X_{|u|u} |u_s| u_s + \\ Y_s'' &= (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v}_s + m u_s r_s - X_{\dot{u}} u_s r_s - Y_v v_s - Y_{|v|v} |v_s| v_s - Y_{|v|r} |v_s| r_s \\ N_s'' &= (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r}_s - (Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}) u_s v_s - N_r r_s - N_{|v|v} |v_s| v_s - N_{|v|r} |v_s| r_s \end{aligned}$$

Die nötigen Kräfte und Momente können berechnet werden, wenn alle Werte auf der rechten Seite der Gleichungen bekannt sind. Das Ziel ist die Ansteuerung von Ruder und Bugstrahl, so dass der Schwerpunkt des Schiffes auf der Leitlinie verbleibt und der Driftwinkel verschwindet. Die Längsdynamik wird dominiert von der Motordrehzahl, welche in diesem Fall nicht als Stellgröße verwendet wird. Die Voraugeschwindigkeit wird nicht geregelt. Die erste Gleichung kann deshalb vernachlässigt werden. Die Voraugeschwindigkeit u wird als zeitvarianter Parameter betrachtet. Es verbleiben der Sollwert der Quergeschwindigkeit v_s und der Sollwert der Drehgeschwindigkeit r_s sowie deren Zeitableitungen als Unbekannte. Der Sollwert der Quergeschwindigkeit sowie die zugehörige Ableitung sind beide Null wegen des verschwindenden Driftwinkelsollwerts. Der Sollwert der Drehgeschwindigkeit sowie

dessen Zeitableitung können ebenso wie oben aus der Zeitableitung der kinematischen Gleichung

$\psi_s = \alpha_s + \beta_s \rightarrow r_s = \dot{\alpha}_s + \dot{\beta}_s$ berechnet werden:

$$v_s = 0$$

$$\dot{v}_s = 0$$

$$r_s = \dot{\alpha}_s + \dot{\beta}_s = u \kappa + 0$$

$$\dot{r}_s = \ddot{\alpha}_s + \ddot{\beta}_s = u^2 \kappa' + 0$$

Wie oben für den Fall der automatischen Bahnführung gezeigt, können auch hier die Kräfte und Momente, die nötig sind, um bei verschwindendem Driftwinkel auf der Leitlinie zu bleiben, mit Hilfe von Größen aus der Leitlinie ausgedrückt werden. Aus den Sollkräften und -momenten können die Sollwerte für den Ruderwinkel und die Bugstrahldrehzahl über entsprechende Aktuatormodelle berechnet werden.

Rückführung

Ein Riccati-Regler mit den Zuständen $\mathbf{x} = (v r d \psi)^T$ kompensiert Modellunsicherheiten und Störungen der Umgebung. d bezeichnet den Abstand zur Leitlinie. Die zugehörige Differentialgleichung für den Abstand d kann aus kinematischen Zusammenhängen mit der Richtung der Leitlinie α_{gl} gewonnen werden:

$$\dot{d} = u \sin(\psi - \alpha_{gl}) + v \cos(\psi - \alpha_{gl})$$

Zusammen mit den Differentialgleichungen für v, r und ψ ergibt sich ein nichtlineares dynamisches Modell der Form

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

Hinweis: \mathbf{u} steht für den Eingangsvektor mit den Größen Ruderwinkel und Bugstrahldrehzahl. Um ein solches nichtlineares Modell in einem Riccati-Regler verwenden zu können, muss es um die Sollwerte \mathbf{x}_s und \mathbf{u}_s linearisiert werden:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_s, \mathbf{u}=\mathbf{u}_s} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_s, \mathbf{u}=\mathbf{u}_s} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}$$

mit

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_s$$

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_s = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_s$$

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_s$$

und

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_s, \mathbf{u}=\mathbf{u}_s} \quad \mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_s, \mathbf{u}=\mathbf{u}_s}$$

Das lineare Modell mit den Matrizen A und B wird schließlich im Riccati-Regler verwendet, um das obige Kostenfunktional mit den beiden Eingängen Ruderwinkel und Bugstrahlrehzahl zu minimieren. Die Gesamtstellgrößen ergeben sich jeweils aus der Summe der Vorsteuerungs- und Rückführungsanteile.

Ergebnisse

Der Manöverregler verwendet zwei Stellgrößen, den Ruderwinkel sowie das Bugstrahlruder. Mit einer solchen Konfiguration ist es möglich Querbewegungen bei einem konstanten Nordwinkel zu realisieren. Bei der klassischen automatischen Bahnführung mit nur einer Stellgröße muss für ein solches Manöver eine S-Kurve gefahren werden. Ein solches Szenario wird in Abbildung 12 dargestellt. Die Anfangsposition des Schiffes liegt zwei Meter rechts von der Leitlinie. Um diesen Anfangsversatz zu eliminieren, wird das Ruder in Richtung Steuerbord bewegt. Dies resultiert in einer Kraft am Ruder, die in Backbordrichtung zeigt. Zur gleichen Zeit wird das Bugstrahlruder vom Regler in einer Weise betätigt, dass auch hier eine Kraft in Backbordrichtung entsteht. Das Bugstrahlruder wirkt auf den Bug des Schiffes, während das Ruder auf das Heck des Schiffes wirkt. Beide Kräfte zeigen in Backbordrichtung. Ihre Größen werden vom Regler so eingestellt, dass das resultierende Moment um die Hochachse verschwindet. Dadurch wird gewährleistet, dass sich der Nordwinkel wie gefordert nicht ändert. Zum Zeitpunkt 50 Sekunden werden die Richtungen beider Kräfte umgekehrt. Diese Bremsphase wird benötigt, um ein Überschießen zu verhindern.

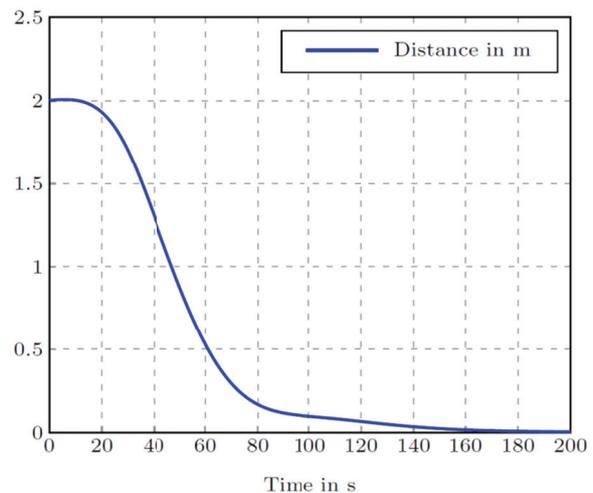
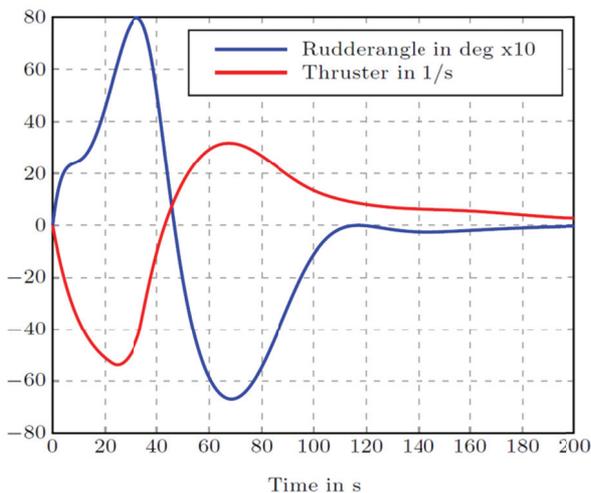


Abbildung 12: Ruderwinkel und Bugstrahlruder sowie Abstand zur Leitlinie während eines Manövers zur Kompensation eines Querversatzes

Literatur

- Blanke, M. (1981). *Ship Propulsion Losses Related to Automatic Steering and Prime Mover Control*. Technical University of Denmark.
- Fossen, T. (2011). *Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Newman, J. (1977). *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Nomoto, K., Taguchi, T., Honda, K., & Hirano, S. (1957). On the Steering Qualities of Ships. *International Shipbuilding Progress* 4.

Verfasser

Dipl.-Ing. Alexander Lutz
Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel.: 0711/685-66306
E-Mail: lutz@isys.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Thorsten Dettmann
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-2750
E-Mail: thorsten.dettmann@baw.de

Dipl.-Ing. Rolf Zentgraf
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-4640
E-Mail: rolf.zentgraf@baw.de