2.8 Binnenwasserstraßen und -häfen

Untersuchungen zur Bestimmung von Fahrrinnenmindestbreiten für Binnenwasserstraßen

Dipl.-Met. Stefanie Wassermann

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Söhngen Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Thorsten Dettmann Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

Der starke Wettbewerbsdruck auf Transportunternehmen in der Binnenschifffahrt gegenüber Schiene und Straße zwingt die Schiffseigner heute schon, das Fahrwasser in Länge wie Breite bis aufs äußerste auszunutzen. Bei zunehmenden Phasen mit extremem Hochoder Niedrigwasser, wie sie aufgrund des Klimawandels in Zukunft auftreten könnten, würde sich diese Situation zusätzlich verschärfen. Gleichzeitig führen schärfere Sicherheitsanforderungen für moderne Binnenschiffe aber zu stetigen Verbesserungen der Steuerfähigkeit der Binnenschiffe. Deshalb ermöglichen die laufenden Entwicklungen in der Konstruktion und Ausrüstung neuer Schiffe besser informierten Schiffsführern, auch in sehr engen Querschnitten sicher zu navigieren. Diese Entwicklungen eröffnen die Möglichkeit, die Fahrrinnenbreite einzuschränken, um bei Niedrigwasser eine möglichst große Fahrrinnentiefe zur Verfügung zu stellen und bei Hochwasser, unter Erhaltung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt, die schiffsverursachten Uferbelastungen zu verringern. Dies könnte dazu beitragen, den Befahrbarkeitszeitraum zu erhöhen und so die Wettbewerbsfähigkeit des Transports auf Binnenwasserstraßen zu stärken bzw. im Fall klimawandelbedingt, evtl. hinsichtlich Dauer und Häufigkeit zunehmender, extremer Wasserstände diese zumindest erhalten. Die vorliegende Veröffentlichung beschreibt die verwendeten Methoden zur Ermittlung von, und erste Ergebnisse bzgl. der minimalen Fahrrinnenbreiten, und deren Abhängigkeit von den Schiffseigenschaften für einen Rheinabschnitt zwischen Mainz und Koblenz.

In einem ersten Schritt wurden dazu Naturuntersuchungen durchgeführt. Diese wurden bezüglich Schiffspfad, Schleppfläche und zugehöriger Wassertiefe innerhalb der vorgenannten, nautisch kritischen Strecke am Rhein ausgewertet, um bestehende Engstellen zu lokalisieren und die Software PeTra1D für fahrdynamische Analysen zu kalibrieren. Dieses Werkzeug erlaubt es, Schiffspfade und die korrespondierende Verkehrsfläche von Schiffen in tiefenbegrenztem Fahrwasser unter Berücksichtigung der longitudinalen Strömungskomponente zu berechnen, und so Trassierungen in Gebieten ohne Messdaten durchzuführen. Bisher unberücksichtigte Einflussfaktoren wie Querströmungen und bestimmte Eigenschaften moderner Schiffe wie z. B. Zwillings- oder Bugstrahlruder sollen in einem kürzlich begonnenen Forschungsprojekt berücksichtigt werden. In diesem Projekt werden 2D-Strömungsmodelle und das autopilotgesteuerte, fahrdynamische Modell PeTra2D auf den wichtigsten Tiefenengpass am Rhein zwischen Mainz und Koblenz angewendet.

Aus der Analyse der oben genannten Naturdaten kann gezeigt werden, dass an bekannten Tiefenengstellen bei niedrigem Wasserstand ca. 1/3 weniger Fahrrinnenbreite ausreichen könnte. Durch eine solche Breiteneinschränkung wird den Baggeraufwand für Herstellung und Unterhaltung einer tieferen Fahrrinne begrenzt, so dass die Fahrrinnentiefe evtl. um 0.2 bis 0.3 m vergrößert werden könnte.

Konkret wird im Folgenden hierzu ein erster Vorschlag für notwendige Mindestbreiten der Fahrrinne vorgestellt. Weiterhin werden die geplanten Arbeiten zur Validierung und Verbesserung des fahrdynamischen Modellverfahrens PeTra2D anhand von geplanten Naturuntersuchungen beschrieben, die derzeit in der Nähe von Rüdesheim vorbereitet werden. Der Artikel schließt mit einem Ausblick auf vorgesehene zukünftige Untersuchungen bezüglich der weiteren Optimierung bestehender Autopiloten im Hinblick auf die optimale Steuerung eines Schiffs im extrem begrenzten Fahrwasser.

1. Einleitung

Die Wirtschaft ist heute auf kosteneffektive Transportmittel für den Güterverkehr angewiesen. In diesem Zusammenhang ist die Binnenschifffahrt seit Jahrzehnten ein wichtiger und verlässlicher Transportsektor, der sich infolge zur Neige gehender fossiler Brennstoffe und zunehmender öffentlicher Diskussion über den Klimawandel jedoch an einem Wendepunkt befindet. Da sich moderne Binnenschiffe durch geringen Treibstoffverbrauch und Personalkosten auszeichnen, gelten sie als eine wirtschaftliche und saubere Transportmethode mit Potential für weitere Treibstoff- und Abgaseinsparungen. Merkliche Veränderungen in den hydrologischen Bedingungen durch den Klimawandel könnten die Verlässlichkeit der Binnenschifffahrt allerdings zukünftig gefährden. Deshalb untersuchen die jüngsten Studien zum Klimawandel, z. B. im Rahmen des deutschen Forschungsprogramms KLIWAS ("Klimawandel, Wasserstraßen und Schifffahrt"), die Bandbreite möglicher Veränderungen sowie die Dauer und Häufigkeit von extremen hydrologischen Bedingungen. Das hier vorgestellte Vorhaben konzentriert sich auf die Entwicklung von Anpassungsoptionen an diese Veränderungen. Diese werden relevant, sollte die laufende Forschung im Bezug auf die hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Schifffahrtsbedingungen merklich verringerte Fahrwasserbreiten und -tiefen erwarten lassen.

Die derzeit denkbaren klimawandelbedingten Veränderungen könnten Schiffseigner verstärkt zwingen, das verfügbare Fahrwasser in Breite wie Tiefe bis an die Grenzen auszuschöpfen. Falls die Betreiber der Wasserstraße darauf mit schärferen Sicherheitsanforderungen reagieren, könnte dies die Entwicklung und Verbreitung verbesserter (Bugstrahl-)Ruderanlagen vorantreiben. Zusätzlich erhöhen aktuelle Entwicklungen in der Konstruktion und Instrumentierung moderner Schiffe in Form besser informierter Schiffsführer besonders in stark beschränktem Fahrwasser die Sicherheit. Eine weitere Anpassungsoption wäre eine Flotte mit angepassten Schiffen. In diesem Zusammenhang kommen z. B. größere Schiffe mit variablerem Tiefgang, kleinere Schiffe für bestimmte Zwecke, oder Schiffe mit wirkungsvolleren Antriebs- und Steuerelementen infrage.

Auf der Basis dieser Entwicklungen wird die Anpassungsoption, die Fahrrinnenbreite bei Niedrigwasser zugunsten von mehr Tiefe zu verringern, zunehmend interessanter. Umgekehrt könnten durch geringere Fahrrinnenbreiten im Fall von Hochwasser die schiffsinduzierten Uferbelastungen vermindert werden, während Sicherheit und Leichtigkeit erhalten bleiben. Die Vorteile bei Hoch- und Niedrigwasser zusammengenommen, könnten das Befahrbarkeitsfenster erweitern und so die Wettbewerbsfähigkeit des Transports auf Wasserstraßen selbst dann erhalten, wenn möglicherweise häufigere und extremere Wasserstände bewältigt werden müssten. Letzteres ist das Ziel unserer Untersuchungen im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprogramms KLIWAS, das sich mit dem nautisch kritischsten Rheinabschnitt zwischen Mainz und Koblenz befasst.

2. Möglichkeiten der Fahrrinnenoptimierung aus Naturuntersuchungen

Im Kontext der Engpassanalyse für den Rhein wurden in den Jahren von 1998 bis 2003 etwa 600 Naturuntersuchungen im Auftrag der deutschen Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) durchgeführt. Dabei wurde Schiffe mit verschiedenen Tiefgängen zwischen Mainz und Koblenz über Wasserstände von extremem Niedrigwasser bis zum höchsten Schifffahrtswasserstand untersucht. Hierfür wurden durch GPS-Empfänger an Bug und Heck einzelner Schiffe der Schiffspfad und die benötigte Verkehrsfläche bestimmt.

untersuchte Der Rheinabschnitt zeichnet sich im ersten Teil bis zur Nahemündung bei Bingen durch geringes Gefälle (~ 0.1 ‰) und große Breiten (~ 400 m), durch mehrere Inseln und eine sandige Sohle aus. Im zweiten Abschnitt stromab von Bingen fließt der Rhein mit größeren Steigungen (bis zu 0.6‰), geringerer Breite von bis zu 200 m, mit engen Kurven (minimale Radien ~ 500 m) und einer Sohle aus grobem Kies, Steinen und Fels, durch die Mittelgebirge Taunus und Westerwald. Der untersuchte Flussabschnitt gilt als nautisch besonders kritisch. Er hat besonders am Nahezufluss bei Bingen bei niedrigen und mittleren Wasserständen die geringsten Fahrrinnentiefen am ganzen schiffbaren Rhein.

Die gemessenen Kursachsen streuen stark in Abhängigkeit von den herrschenden Fahrwasserbedingungen und den persönlichen Neigungen der Schiffsführer. Engpassbedingungen sind bei diesen Daten durch geringe Unterschiede zwischen den jeweiligen Fahrwassertiefen und den beobachteten Schiffstiefgängen gekennzeichnet. In diesem Fall sollten die beobachteten Kursachsen den Kurs mit der durchschnittlich größten Tiefe reflektieren und deshalb Tiefenengpässe aufzeigen.

Die beobachteten Kursachsen und Schleppflächen der unter Engpassbedingungen fahrenden Schiffe erwiesen sich als weitgehend unabhängig von Tiefgang, Wasserstand, Schiffslänge und Kurvenradius, außer im Fall sehr enger Kurven, so dass die meisten Kursachsen gemittelt werden konnten. Zugunsten eines möglichst großen Datenkollektivs wurde, eingedenk der Datenstreuung, bei der Mittelung der Kursachsen nur nach der Fahrtrichtung (Bergfahrer, Talfahrer) unterschieden. Dies gilt für Wasserstände bis ca. 1.25 m über dem Bemessungs-Niedrigwasserstand GIW (Wahrscheinlichkeit etwa 20 eisfreie Tage pro Jahr).

Die gemittelten Kursachsen und Fahrspuren zeigen, dass nur ein geringer Anteil des Fahrwassers unter Engpassbedingungen tatsächlich genutzt wurde. Die Wahl der Fahrrinnenseite variierte von Flussabschnitt zu Flussabschnitt. Abb.1 zeigt ein Beispiel der Auswertung von Schiffsbeobachtungen für einen einspurigen Talfahrer. Der gemessene Kurs spiegelt die Querschnitte mit den günstigsten Fahrwasserbedingungen wieder, der gewöhnlich mit den größten Tiefen übereinstimmt. Die Einhüllende repräsentiert die Datenstreuung. Zusammen mit der Auswertung der zugehörigen Daten für den Bergfahrer ergibt sich, dass zumindest die beobachteten Schiffe mit Breiten unter 11.4 m nur rund 50 % der bestehenden Fahrrinnenbreite nutzten.





Die Frage ist nun, ob dies auch für die breitesten und längsten zugelassenen Schiffe wie Schubverbände, bestehend aus einem Schubschiff und vier Leichtern, die paarweise hintereinander und seitlich gekoppelt sind, gilt (Gesamtlänge $L_p = 187$ m). Die oben beschriebenen Daten geben näherungsweise auch im Bezug auf diesen Schiffstyp Aufschluss, wenn die Radien der Kursachse und die Positionen des taktischen Drehpunkts im Verhältnis zur Länge des beobachteten Schiffs L_a als Konstante aufgefasst werden. Die Zu-



Abbildung 2: Notwendige Fahrrinnenmindestbreite für Begegnungsverkehr von einspurigen Schubverbänden aus Messdaten einschließlich Sicherheitsabständen (blau) im Vergleich zur bestehenden Fahrrinnenbreite (rot), aufgetragen im Abstand zum linken Fahrrinnenrand.

satzbreite (Fahrspurbreite minus Schiffsbreite) dieser großen Fahrzeuge kann dann durch Multiplikation der beobachteten, mittleren Zusatzbreite mit dem Faktor L_a^2/L_p^2 errechnet werden. Durch Addition mit der Schiffsbreite erhält man die Fahrspurbreite des Schubverbandes.

Die Auswertung für Berg- und Talfahrer unter Engpassbedingungen zeigt nun, dass ein erfahrener Schiffsführer bei mittleren und niedrigen Wasserständen die vorhandene Fahrrinnenbreite von 120 m nur zu rund zwei Dritteln ausnutzt (Abb. 2).





Ausnahmen zu diesen Ergebnissen bilden einige Breitenengpässe, wie z. B. zwischen dem Tauberwerthfelsen und der Kiesbank des Jungferngrunds bei Rheinkm 550.0, und am berühmten Loreley-Felsen bei Rheinkm 555.0. Dort ist eine sichere und leichte Begegnung von Schubverbänden aufgrund der engen Kurven in der bestehenden Fahrrinnenbreite schon jetzt nicht möglich. Nach diesen Ergebnissen erscheint an Tiefenengstellen eine Breiteneinschränkung von 40 m möglich.

> Im Anschluss an die oben beschriebene Analyse der Breitenengstellen wurden die Tiefenengstellen lokalisiert. Hierfür wurde die Wassertiefe innerhalb der mittleren Schleppfläche für diejenigen hydrologischen Bedingungen ermittelt, bei denen der mögliche Tiefgang durch die Wassertiefe begrenzt ist. Die zugehörigen morphologischen Bedingungen wurden Peilungen aus den Jahren 1990, 1998 und 2004 entnommen. Diese spiegeln Sedimenttransportprozesse und Maßnahmen zur Fahrrinnenunterhaltung wieder. Tiefenengstellen ergeben sich in Abb. 3 dort, wo sich die minimalen Wassertiefen unter dem Schiff im Kursachsenverlauf (rot) und der

abladebedingte Tiefenanspruch (gelb) am stärksten annähern oder sich überschneiden. Sie erweisen sich als nahezu wasserstandsunabhängig und stationär, und liegen in breiten Flussabschnitten mit Inseln und Furten. Deshalb sind sie offenbar durch Sedimentationsprozessen in einem breiten Fluss verursacht, wo Anlandungen durch Baggerung wesentlich effizienter entgegengewirkt werden kann als durch Flussregelungsmaßnahmen.

Die Ausdehnung dieser Tiefenengpässe nimmt mit der angestrebten Fahrrinnentiefe stark zu. Bei einer Erhö-

hung der bestehenden Fahrrinnentiefe (1.9 m bei GIW) um 0.2 – 0.3 m machen die zugehörigen Engpassabschnitte jedoch immer noch weniger als 1/10 des betrachteten Flussabschnitts aus.

Die bestehende Fahrrinnentiefe könnte demnach allein durch lokale Unterhaltungsmaßnahmen signifikant verbessert werden. Reduziert man die Fahrrinnenbreite ausschließlich an den oben dargestellten Tiefenengpässen, könnte die Tiefe gemäß den vorliegenden Daten bei noch vertretbar erscheinendem Unterhaltungsaufwand um etwa 0.2 bis 0.3 m erhöht werden. Nautisch erscheinen die hierfür benötigten Breiteneinschränkungen akzeptabel, da Tiefen- und Breitenengpässe räumlich nicht zusammenfallen. Erstere liegen in geraden Flussabschnitten, letztere in engen Kurven. Die kosteneffektive Fahrrinnenvertiefung um 0.2 bis 0.3 m auf verminderter Fahrrinnenbreite kann deshalb als eine von mehreren Optionen zum Ausgleich zukünftig nicht auszuschließender Veränderungen durch den Klimawandel betrachtet werden.

3. Methoden

3.1 Das eindimensionale, fahrdynamische Model PeTra1D

Die Analyse von Naturuntersuchungen im vorangehenden Kapitel erlaubt eine erste Einschätzung notwendiger Mindestfahrrinnendimensionen im betrachteten Rheinabschnitt. Im Folgenden wird die optimale Lage der Fahrrinne untersucht. Dafür wird das Model PeTra1D (eindimensionale Pegelabhängige Trassierung) zur automatischen Kursachsengenerierung an den bekannten Tiefenengpässen im Bereich der Nahemündung eingesetzt. Das Modell verwendet einen quasistationären Ansatz zum Ausgleich der Zentrifugalkraft in der Kurvenfahrt und die durch die seitliche und unterseitige Umströmung des Schiffs beim Driften verursachten Kräfte auf die Schiffshülle. Das Modell berechnet die Position des taktischen Drehpunkts des Schiffs, die vom Tiefgang, dem Schiffstyp, der Wassertiefe, der Längskomponente der Strömungsgeschwindigkeit und der Schiffsgeschwindigkeit abhängt.

Am taktischen Drehpunkt werden parallel zur der vorgegebenen Kursachse Schiffssymbole platziert, aus denen sich geometrisch der Verkehrsflächenbedarf des fahrenden Schiffs ergibt. Für große Radien wird die zugehörige Schleppfläche aus Sicherheitsgründen um ein bestimmtes Maß vergrößert, um die Instabilität des Schiffspfades zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu anderen Trassierungsmodellen ist PeTra1D in der Lage, automatisch Kursachsen zu generieren (virtuelle Navigation), die den Fahrwegen realer Schiffsführer nahe kommen. Der Benutzer kann die virtuelle Navigation durch sog. gewichtete "Potentiale" kontrollieren, die sich z. B. auf die Wassertiefe oder die Geschwindigkeitsverteilung beziehen. Zusätzlich werden Eingangsdaten zu den Schiffseigenschaften, den Grenzen der Wasserstraße, der Flussmorphologie, den Querprofilen und der zugehörigen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit, den Verkehrsregeln sowie der Position und Breite von Brückenpfeilern benötigt.

Bei der virtuellen Navigation werden Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen aus einem eindimensionalen hydrodynamischen Model berücksichtigt. Die resultierende Route folgt in der Bergfahrt überwiegend den kleinsten, in der Talfahrt den größten Fließgeschwindigkeiten, wenn nicht die Fahrwassertiefe relevant ist. Ergebnisse der Berechnungen sind die Kurvatur der Kursachse, die Schiffsgeschwindigkeit, die Position des taktischen Drehpunkts und die resultierende notwendige Fahrspurbreite, sowie die Verkehrsbedingungen (Dettmann und Zentgraf, 2002).

Mit Rücksicht auf die typischen Flottenstruktur und die Verkehrssituation bei Niedrigwasser im erwähnten Flussabschnitt werden die häufig verkehrenden Schubverbände aus einem Schubboot und zwei Leichtern oder aus einem Großmotorgüterschiff (GMS) und einem Leichter anstelle des größten lizenzierten Schiffstyps (Schubverband mit Gesamtlänge von 186.5 m und Gesamtbreite von 22.9 m) als Bemessungsschiff zur Optimierung der Fahrrinne herangezogen. Die oben genannten "Potentiale" bei der virtuellen Navigation in PeTra1D werden so gewichtet, dass das Schiff überwiegend dem Kurs mit der größten Wassertiefe folgt, um so den Aufwand für Baggerungen gering zu halten. Da PeTra1D getrennte Modellläufe für jede Kursachse erfordert, wurde zunächst die Fahrt des Bergfahrers entlang der obigen tiefenoptimierten Kursachse berechnet, da dieser normalerweise privilegiert ist, seine Kursachse frei zu wählen. Der Talfahrer folgt in einem zweiten Modelllauf ebenfalls einer Kursachse entlang der größten Tiefen, und soll in zweiter Linie unter Einhaltung der üblichen Sicherheitsabstände möglichst nahe an der Route des entgegenkommenden Schiffs entlang fahren.

Anstelle der üblichen Anwendung von PeTra1D mit eindimensionalen Eingangsdaten wurden in dieser Arbeit Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertiefen aus einem 2D hydrodynamischen Model auf der Basis von Telemac2D verwendet, da diese besseren Daten zur Verfügung standen. Telemac2D ist eine Finite-Elemente-Methode um die tiefengemittelte Flusshydrodynamik zu berechnen. Es liefert Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände basierend auf der Flussmorphologie aus Peilungen aus dem Jahr 2004. Die Ergebnisse aus diesem Ansatz werden in Kapitel 4 vorgestellt.

3.2 Das zweidimensionale fahrdynamische Modell PeTra2D

Wie oben erwähnt ist PeTra1D vor allem auf guasistationäre Strömungen und Fahrbedingungen anwendbar. Mit Rücksicht auf die Variabilität des Strömungsfelds und der Wassertiefen im oben genannten Rheinabschnitt, besonders an Inseln mit nennenswerter Querströmung und in engen Kurven mit Wassertiefenänderungen von 2 m bis zu 15 m entlang der Kursachse, wurde die Befahrbarkeit der verengten Fahrrinne durch die Anwendung des zweidimensionalen fahrdynamischen Modells PeTra2D überprüft. Letzteres wurde im Auftrag der BAW von Kolarov (2006) entwickelt. Es löst die Impulsbilanzgleichung für ein fahrendes Schiff zweidimensional (laterale Bewegung und Rotation). Kräfte durch Trägheit, Wirbel und Zähigkeit des das Schiff umgebenden Strömungsfelds werden unter Anwendung der Theorie schlanker Körper durch die Einführung von Zusatztermen in die Bewegungsgleichung berücksichtigt. Die Querkräfte auf das Unterwasserschiff werden aufgeteilt in Terme, die linear zur Querkomponente vg der Strömungsgeschwindigkeit sind, und Terme die proportional zu v_q^2 sind. Erstere werden mit Hilfe der Impulsmethode, basierend auf lokalen Gradienten (von Spant zu Spant) des Produkts aus va und der hydrodynamischen Masse mh pro Meter Schiffslänge berechnet. Die Zusatzmasse mh wird mit Hilfe der Panelmethode ermittelt. Die nichtlinearen Kräfte verwenden den üblichen Ansatz des dynamischen Drucks, wobei der Widerstandskoeffizient cw in Querrichtung stark vom Verhältnis des lokalen Tiefgangs T zur Wassertiefe d abhängt. Kolarov (2006) bestimmte cw durch Modellversuche.

In der aktuellen Version von PeTra2D wird der Einfluss der vom Schiff selbst erzeugten Strömung noch vernachlässigt. Diese Annahme ist für die meisten hier untersuchten Fälle gerechtfertigt, da die Querprofile im betrachteten Rheinabschnitt relativ groß im Vergleich zum benetzten Anteil der Schiffshülle sind und ausreichende Sicherheitsabstände zwischen Schiff und Ufer bzw. Regelungsbauwerken eingehalten werden können.

Das Modellschiff wird in PeTra2D durch einen automatischen Bahnführungsalgorithmus gesteuert. Die entsprechende Software wurde durch die Firma "Innovative Navigation GmbH" entwickelt. Sie ist eine experimentelle Version von kommerziell genutzten Autopiloten, basierend auf einem Inland ECDIS Navigationssystem namens "RADARpilot 720° " (Innovative Navigati-on, Sandler, 2005, Münch, 2007). Dieser wurde erfolgreich an Bord verschiedener Binnenschiffe vom Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart getestet. Der Bahnführungsalgorithmus, der derzeit in PeTra2D implementiert ist, folgt einer Kursachse aus Linien und Kreisbögen, die vorab z. B. mit dem Routenplanungsalgorithmus aus PeTra1D erzeugt wird. Der Routenplanungsalgorithmus gilt daher strenggenommen, wie PeTra1D, nur für quasistationäre Verhältnisse. Die Verbesserung dieses Ansatzes ist Teil des BAW-Projekts im Rahmen von KLIWAS.

Für eine vorgegebene Propellerdrehzahl korrigiert der virtuelle Schiffsführer den aktuellen Ruderwinkel entsprechen den aktuellen Differenzen zwischen berechneter Schiffsposition und Fahrtrichtung im Vergleich zum vordefinierten Kurs durch regelungstechnische Methoden. Die resultierende Schleppfläche hängt dabei stark vom Zeitschritt, der Schiffsgeschwindigkeit und dem gewählten Referenzpunkt ab, an dem die Abweichung zum angestrebten Kurs ermittelt wird.

Die Schiffseigenschaften werden in der aktuellen Version von PeTra2D geometrisch durch eine spantweise vorgegebene dreidimensionale Schiffshülle mit ladungsabhängigem Tiefgang beschrieben. Die derzeit implementierten Ansätze für Ruder- und Propellereigenschaften sind überwiegend aus Standardmanövern mit Seeschiffen abgeleitet. Auf der Basis von Modellversuchen des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme in Duisburg (DST, Deutschland) wird dieser Ansatz demnächst im Rahmen von KLIWAS verbessert (vergleiche Abschnitt 5). Eine wesentliche Besonderheit von PeTra2D ist eine spezielle Formel zur Berechnung des Schiffswiderstands unter Berücksichtigung des Einflusses veränderlicher Querprofile, Strömungsgeschwindigkeiten und Sohlrauhigkeiten entlang der Kursachse. Details hierzu werden im folgenden Kapitel beschrieben. Diese Formel arbeitet derzeit noch mit 1D Daten. Der Nachteil der dadurch erforderlichen Iteration zur Kombination von 1D und 2D Daten soll in der nächsten Version von PeTra2D gelöst werden, indem die notwendigen Querprofile an der aktuellen Schiffsposition während der PeTra2D Simulation direkt aus den 2D-Daten generiert werden.

3.3 Approximation des Schiffswiderstandes

Der Schiffswiderstand ist ein wichtiger Faktor bei der Berechnung der notwendigen Fahrrinnenbreiten. Er bestimmt die maximal mögliche Schiffsgeschwindigkeit und damit die Fahrspurbreite. Beispielsweise ist ein Schiff bei kleinen Schiffsgeschwindigkeiten einer Querströmung, z. B. an Buhnen, länger ausgesetzt als bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten, bei denen auch die Querkräfte auf das Unterwasserschiff beim Driften in engen Kurven höher sind als bei langsamer Fahrt, woraus geringere Fahrspurbreiten resultieren. Diese Effekte sind im betrachteten Flussabschnitt vor allem stromab von Bingen von Bedeutung. Dort schaffen sehr starke hydraulische Gradienten, große Strömungsgeschwindigkeiten und eine felsige Sohle schwierige Bedingungen, vor allem für Bergfahrer. Für diese werden die hydraulischen Gradienten durch die schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten vor allem an Stellen mit hoher Sohlrauhigkeit zusätzlich verstärkt. Da die gebräuchlichen Formeln zur Berechnung des Schiffswiderstands diesen wichtigen Effekt nicht erfassen, wurde ein spezieller Ansatz entwickelt. Dabei kann der Wellenwiderstand, der stark von der Form des Schiffskörpers abhängt, für Binnenfrachtschiffe vernachlässigt werden, da diese normalerweise mit deutlich geringeren Schiffsgeschwindigkeit im Vergleich zu Seeschiffen fahren. Damit lassen sich Formeln aus der Literatur zur Berücksichtigung der für die hier betrachteten Fälle meist dominanten Reibungseffekte an der Außenhaut und für den Nachstrom hinter dem Heck verwenden.

Aus diesen Formeln lässt sich Gleichung (2) ableiten, die anhand umfänglicher Daten aus Natur- und Modelluntersuchungen kalibriert wurde. Die Formel berücksichtigt den Anstieg des Reibungswiderstands an der Schiffshaut, des Nachstroms und des hydraulischen Gradienten aufgrund der Rückströmung, die die Strömungsgeschwindigkeit relativ zur Schiffhülle und relativ zur Sohle in der Umgebung des Schiffs in der Bergfahrt erhöht, in der Talfahrt in der Regel aber reduziert.

Der Ansatz verwendet ein Trapezprofil (vgl. Beispiel Abb. 6), mit dem die realen Querschnittsverhältnisse im Bereich des Schiffspfades angenähert werden (Ersatztrapezprofil). Es ist durch die Wassertiefe d und die effektive Breite des rückströmungswirksamen Querschnittsbereiches beff bestimmt, der vor allem von der Schiffslänge abhängt (BAW, 2004), wenn die Fahrwasserbreite nicht kleiner als b_{eff} ist. Die mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit ist dabei wie folgt von der effektiven Fläche A_{Keff} des Ersatztrapezprofils abhängig:

$$\overline{v_R} = v s_{DW} \cdot \left(\frac{A_{Keff}}{A_{Keff,a} - A_{Seff}} - 1 \right)$$
(1)

Die Ersatztrapezprofile werden aus der tatsächlichen Sohltopografie des Flusses in der Nachbarschaft des Schiffs aus Querprofilen alle 100 m errechnet (siehe Beispiel Abb. 4). Die zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten wurden dem 1D hydrodynamischen CASCA-DE-Modell der BAW entnommen.

Die Erstellung von Trapezprofilen vor jeder Berechnung verlangt Informationen über den Schiffspfad und den Driftwinkel des Schiffes, die dessen effektive Breite und damit den Strömungswiderstand des Schiffs bestimmen. Darüber hinaus müssen 1D-Daten (querprofilweise) mit 2D-Daten (Strömungsgeschwindigkeiten und Sohltopografie) verwendet werden. Obwohl diese Lösung wenig elegant ist und mehrere Iterationen für ein einziges Ergebnis erfordert, das den Driftwinkel korrekt berücksichtigt, können im Vergleich zu Ansätzen in kommerziellen Schiffsführungssimulatoren realitätsnahe Schiffswiderstände errechnet werden, insbesondere in Engpassstrecken mit großem Gefälle und Felssohle sowie in Strecken mit stark wechselnden Querschnittsverhältnissen, in denen diese Faktoren einen großen Einfluss auf die möglichen Schiffsgeschwindigkeiten haben.



Abbildung 4: Ersatztrapezprofil (rot) für das Querprofil bei Rhein-km 498.1 (schwarz) unterhalb des Wasserspiegels (blau) aus einer Peilung aus dem Jahr 2004, wie es in PeTra2D für die Berechnung des Schiffswiderstands verwendet wird. Grün: Rechtecksymbol für das Schiff (Breite 1.6 m, Tiefgang 2.8 m)

Mit Hilfe der mittleren Rückströmungsgeschwindigkeit

 v_R kann der Schiffswiderstand, der sich aus den Komponenten Ablösewiderstand (1. Term in der Klammer), Reibungswiderstand (2. Term) und dem Widerstand aus aufgeprägtem und rückströmungsbedingtem Gefälle (3. Term) zusammensetzt, folgendermaßen berechnet werden:

- k_s mittlere Rauhigkeit der Sohle / des Ufers [m],
- ρ Dichte des Wassers [kg/m³],
- C_G fahrtrichtungsabhängiges Vorzeichen (unterschiedlich für Berg- und Talfahrer),
- λ_{s}, c_{w} empirisch berechnete Parameter,
- C_K, C_{Str} Korrekturfaktor (ca. 0.75-1.3),
- δ Völligkeitskoeffizient des Schiffs, etwa 0.9 für Binnenschiffe,

Der Parameter c_G ist positiv für Bergfahrer und hängt beim Talfahrer von der Richtung des rückströmungsbeeinflussten lokalen Schiffsumströmungsfeldes ab, entsprechend $c_G = sign(\bar{v}_R - v_{Str})$. Anhand von Kalibrierungsdaten wird der Parameter c_k für einen Schubverband als konstant mit einem Wert von 1.3 angenommen. Der Widerstandsbeiwert λ_S wird

aus der Schiffslänge und der Rauhigkeit der Schiffshülle k_{SS} gemäß gängigen Grenzschichtansätzen wie folgt berechnet:

$$\lambda_{s} \approx 4 \cdot \left[1.89 - 1.62 \cdot \log_{10} \left(\frac{k_{SS}}{I_{S}} \right) \right]^{-2.5}$$
(3)

$$W \approx \rho \cdot \frac{(vs_{DW} + v_{R})}{2} \cdot b_{seff} \cdot I_{s} \cdot \left[c_{w} \frac{t_{s,max}}{I_{s}} + \frac{\lambda_{s}}{4} \left(1 + 2 \cdot \frac{t_{s}}{b_{seff}} \right) \cdot \delta \right] \cdot c_{k} + c_{G} \cdot 0,184 \cdot \left(\frac{k_{s}}{4h_{0}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho$$

$$\cdot \frac{v_{str,eff}}{8} \cdot \frac{t_{s}}{h_{0}} \cdot I_{s} \cdot \left(b_{seff} + 2t_{s} \right) \cdot c_{str} \cdot \delta$$
(2)

W Strömungswiderstand des Schiffs [N],

- v_R Mittelwert der Rückströmungsgeschwindigkeit an Bug und Heck [m/s],
- *vs_{DW}* Geschwindigkeit des Schiffes durch das Wasser [m/s],
- b_{seff} driftwinkelabhängige, effektive Breite des Schiffs [m],
- t_s Mittelwert des Tiefgangs an Bug und Heck [m],
- $t_{s.max}$ maximaler Tiefgang [m],
- $v_{Str,eff}$ effektive Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrtrichtung [m/s],
- h_0 Wassertiefe in der Mitte des kongruenten Trapezes [m],

Der verbleibende Parameter c_w für den Ablösewiderstand ist vom Tiefgang- zu Wassertiefenverhältnis abhängig und kann nach Modelluntersuchungen mit

$$c_{w} = C_{a}^{*} \cdot \left[0.1 + 0.2 \cdot \left(\frac{t_{S,\max}}{h_{0}} \right)^{2} \right].$$
(4)

abgeschätzt werden.

4. Bestimmung der minimalen Fahrrinnenbereite für einen Abschnitt des Mittelrheins

4.1 Einführung

Das kürzlich begonnene, fünfjährige Projekt im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS soll einen verlässlichen Entwurf für eine klimawandelangepasste Fahrrinne am Mittelrhein erarbeiten. Da die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung detaillierte Informationen über die ökonomischen Vorteile jeder Anpassungsmaßnahme benötigt, zumal die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt ggf. eingeschränkt werden könnte und zusätzliche finanzielle Aufwendungen zu besorgen sind, sollen möglichst genaue Aussagen durch Naturuntersuchungen erarbeitet werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf eine kurze Musterstrecke im Bereich der wichtigsten in Kapitel 2 beschriebenen Tiefenengpässe.

Ein erster Vorschlag für die Fahrrinnenanpassung an extreme Niedrigwasserbedingungen wurde anhand bestehender Messdaten (siehe Kapitel 2) und der fahrdynamischen Modelle im derzeitigen Entwicklungszustand erstellt. In der Musterstrecke soll die bestehende Fahrrinne auf ca. 4 km Länge eingeengt werden, um die berechneten minimalen Fahrrinnenbreiten zu validieren. Unter denselben Bedingungen sollen der laufende Verkehr beobachtet und spezielle nautische Untersuchungen durchgeführt werden. Die resultierenden Daten dienen der Kalibrierung der verwendeten fahrdynamischen Modellverfahren, insbesondere PeTra2D. Um den Einfluss des sogenannten "human factor" zu berücksichtigen, z. B. im automatischen Bahnführungsalgorithmus, sind Untersuchungen zu arbeitsmedizinischen Fragestellungen wie Stressverarbeitung der Schiffsführer eingeplant. Details zum "human factor" werden in Kapitel 5 beschrieben.

4.2 Vergleich der Ergebnisse von 1D und 2D Modell

Um die Unterhaltungskosten der vorgeschlagenen Mindestbreiten abzuschätzen, sollen die jährlichen Baggermengen in Abhängigkeit von Breite und Tiefe der Fahrrinne in zwei Testgebieten (3 und 4 km lang) untersucht werden, in denen heute die größten Baggermenge auftreten. Die resultierenden Daten werden zur Kalibrierung von Sedimenttransportmodellen bezüglich der Baggermengen verwendet. Zur Ermittlung der voraussichtlichen Kosten des Naturversuchs, und als Vorinformation für das wirtschaftliche Potential der Mindestfahrrinnenbreiten, wurden im Vorfeld des Naturversuchs erste Einschätzungen zur Mindestbreite und zu den Baggermengen vorgenommen. Die zugehörigen Ergebnisse für eine der möglichen Anpassungsmethoden, die nachfolgend "Fahrrinne in der Fahrrinne" (FiF2, "2" steht für "zweiter Entwurf" nach Glättung) genannt wird, werden im Folgenden erläutert. FiF2 hat die Unterhaltung der bestehenden Fahrrinnendimensionen wie bisher zum Ziel, wobei auf verringerter Breite an Tiefenengpässen mehr Tiefe zur Verfügung gestellt werden soll.

Im ersten Schritt des Projekts wurden die oben beschriebenen Untersuchungsdaten, zusammen mit Be-

> rechnungen aus PeTra1D, für den Entwurf der verengten Fahrrinne verwendet. PeTra1D entspricht dem aktuellen Stand der Technik für die Engpassanalyse an deutschen Wasserstraßen. Um Unsicherheiten des Modells zu erkennen, wurden Ergebnisse der 1D- und 2D-Modelle im Hinblick auf Schleppfläche und Schiffspfad verglichen. Beide Modelle basieren auf derselben Datengrundlage bzgl. Kursachsen, Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten. Unterschiede in den Ergebnissen resultieren daher hauptsächlich aus der genaueren physikalischen Beschreibung des Schiffsverhaltens in PeTra2D, besonders im Hinblick auf die Schiffseigenschaften und den Querströmungseinfluss.

> Ein Beispiel für den Vergleich beider Modelle zeigt Abb. 5. Dargestellt ist ein Großmotorgüterschiff (GMS) in Bergfahrt (PeTra2D) und ein einspuriger Schubverband, bestehend aus einem GMS und einem Leichter in Berg- und Talfahrt (PeTra1D und -2D) mit Tiefgängen von jeweils 2.8 m. Der zugrundeliegende Abfluss beträgt 1490 m³/s und entspricht dem Ausbauzentralwasserstand am Pegel Kaub.





In stark gewundenen Flussabschnitten liefern die PeTra1D-Berechnungen generell größere Breiten als das 2D-Modell, da die nautischen Eigenschaften des Schiffs im Vergleich zum realen Schiff in PeTra1D aus Sicherheitsgründen künstlich schlechter gewählt wer-Dagegen ergeben sich anhand der den. 2D-Berechnungen deutlich größere Verkehrsflächenbreiten im Vergleich zu den 1D-Ergebnissen, wo im dargestellten Flussabschnitt stromab der Insel Ilmenaue und stromauf der Insel Rüdesheimer Aue (Rhein-km 424.2-524.5) signifikante Querströmungen den Kurs des Schiffes beeinflussen. Diese Ergebnisse belegen die Notwendigkeit, vorzugsweise ein 2D-Modell zur Fahrrinnenbemessung zu verwenden, sobald Querströmungen auftreten, da der 1D-Ansatz in diesem Fall nicht auf der sicheren Seite ist.

Abb. 5 zeigt darüber hinaus den ersten Vorschlag zu notwendigen Mindestbreiten der "Fahrrinne in der Fahrrinne" (schwarze Punkte an jedem Hektometer, FiF2), abgeleitet aus Schleppflächenberechnungen mit PeTra1D (hellgrüne und orangefarbene Rechtecke; typische aufgeschlagene Sicherheitsabstände als Linien derselben Farbe). Die Fahrrinnengrenzen wurden manuell geglättet um einen eingängigen Verlauf der Fahrrinnenränder zu erzielen. Die Schleppflächen aus Naturuntersuchungen (in Abb. 5 nicht dargestellt) unterstützen diesen Fahrrinnenverlauf.

4.3 Eine erste Schätzung der erforderlichen Unterhaltungsbaggermengen

Ausgehend von der Entwurfsvariante FiF2 wurden die zur Herstellung und Unterhaltung dieser Variante notwendigen Baggervolumina mit Hilfe bestehender Daten aus der Baggerungsdatenbank der WSV anhand der letzten 15 Jahre geschätzt. Die zugehörige Flusstopografie wurde den Peilungen von 1995, 2004 und 2008 entnommen. Breite und Verlauf der FiF2 wurden im oben beschriebenen Verfahren ermittelt und folgen zur Begrenzung der Baggermengen, soweit nautisch möglich, den größten natürlichen Tiefen. Die FiF2 nimmt im betrachteten Flussabschnitt etwa 80 m der bestehenden Fahrrinne ein. Die erforderlichen Herstellungsmengen Vb sind in Abb. 6 in Abhängigkeit der Baggertiefe dargestellt. Sie wurden aus dem Mittelwert von drei repräsentativen Peilungen der Jahre 1995, 2004 und 2008 innerhalb der ausgewählten 3 und 4 km langen Testabschnitte für die bestehende Fahrrinne und die Variante FiF2 bestimmt. Die sog. "Baggertiefe" bezeichnet dabei die Fahrrinnentiefe, die durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung garantiert wird zzgl. zulässiger Baggertoleranzen und der Zusatztiefe zur Vergrößerung des Zeitintervalls zwischen zwei Unterhaltungsmaßnahmen (Vorratsbaggerung). Die Herstellungs- bzw. Baggertiefe liegt somit rund 0.4 m unterhalb der Fahrrinnentiefe. Demgemäß entspricht eine Herstellungstiefe von 2.3 m einer Fahrrinnentiefe von 1.9 m.

Bezogen auf die herkömmliche Fahrrinnentiefe unterscheiden sich die Herstellungsmengen für die gesamte gegenüber der verengten Fahrrinnenbreite nur wenig. Mit zunehmender Fahrrinnentiefe wachsen die Herstellungsvolumina für die volle Fahrrinnenbreite jedoch deutlich stärker als bei der Variante FiF2. Bei Umsetzung der FiF2-Lösung wären daher nach heutigem Wissensstand Einsparungen für die WSV möglich. Nimmt man einen plausiblen linearen Zusammenhang zwischen dem Volumen Vd der jährlichen Unterhaltungsbaggermengen und den geometrisch ermittelten Herstellungsvolumina V_b aus Abb. 6 an, können die jährlichen Unterhaltungskosten für die Tieferunterhaltung beider Varianten geschätzt werden. Hierbei ergibt sich aus dem dokumentierten Unterhaltungsaufwand und der geometrisch notwendigen Herstellungsmenge für die heutige Fahrrinnentiefe der zugehörige Proportionalitätsfaktor $f_d = V_d / V_b$ zu etwa 3.4 (Bingen) bis 4.5 (Oestrich). Er wird für den gewählten Abschnitt als konstant angenommen. Durch Multiplikation mit den Fehlvolumina für größere Tiefen erhält man daraus eine Abschätzung des voraussichtlichen jährlichen Unterhaltungsaufwands für andere Fahrrinnentiefen.



Abbildung 6: Volumen V_b zwischen mittlerer Sohllage und verschiedenen Herstellungstiefen für bestehende und verminderte Fahrrinnenbreite (bestehende Fahrrinne: blaue und rote Linien, FiF2: orangefarbene und braune Linien), berechnet für zwei verschiedene Teststrecken an bestehenden Tiefenengpässen des Mittelrheins

Mit diesem Ansatz errechnen sich bei 0.2 m zusätzlicher Tiefe für die FiF2 (Herstellungstiefe von 2.5 m) zusätzliche jährliche Baggermengen von etwa 28000 m³. Bei Unterhaltung der ganzen bestehenden Fahrrinnenbreite um 0.2 m mehr als bisher ergäbe sich etwa der dreifache Baggeraufwand.

4.4 Geplante experimentelle Validierung

Die verengte Fahrrinne FiF2 soll am Mittelrhein bei Rüdesheim (Rhein-km 524.0-528.0) durch Bojen über wenige km während zwei einwöchiger Versuchsphasen, einmal bei Niedrig- und einmal bei Mittelwasser, umgesetzt werden. Während dieser Zeit werden zwei Kameras den Testbereich einschließlich angenommener Wartestellen stromauf und stromab des ausgetonnten Bereiches



Abbildung 7: Blick zweier Kameras auf dem Turm der Rochus-Kapelle in Bingen ins Testgebiet bei Rüdesheim; links: voraussichtliche Wartestelle (geplante Kamera 1); rechts: zu untersuchender Flussabschnitt (geplante Kamera 2)

aufzeichnen (Abb. 7). Der Vergleich mit Aufnahmen bei vergleichbaren Wasserständen außerhalb des Einengungszeitraums soll zeigen, ob signifikante Unterschiede zur heutigen Verkehrssituation feststellbar sind. Dies wäre z. B. der Fall, wenn Schiffsführer großer Fahrzeuge durch Warten außerhalb des verengten Bereiches Begegnungen und Überholmanöver vermeiden, oder ihre Fahrweise vor allem bzgl. der Geschwindigkeit bei Manövern anpassen.

Während der beiden einwöchigen Beobachtungsphasen sollen Routen und Schleppflächen von etwa 50 Schiffen des laufenden Verkehrs erfasst werden. Parallel zur Datenaufzeichnung wird die persönliche Einschätzung der Schiffsführer bzgl. der Mindestbreiten, durchgeführte Manöver, Fahrverhalten und der eventuelle Einsatz des Bugstrahlruders erfragt. Zusätzlich sollen mit zwei angemieteten Schiffen spezielle Untersuchungen durchgeführt werden. Neben der geodätischen Einmessung sollen diese Schiffe mit zusätzlichen Sensoren für die Drehzahl von Haupt- und Bugstrahlruder sowie des Ruderwinkels ausgerüstet werden. Zur Kalibrierung der fahrdynamischen Modelle werden typische nautische Fahrsituationen wie Anschwenkmanöver simuliert. Außerdem werden Pfahlzugmessungen durchgeführt und die Wechselwirkungen mit Buhnenfeldern erfasst.

Die genannten Beobachtungen, nautischen Experimente und die Schiffsführerbefragung werden durch hydrologische Messungen und Messungen von Sedimenttransportprozessen begleitet. Zusätzliche Peilungen sollen aktuelle Eingangsdaten für nautische, hydraulische und Sedimenttransportmodelle liefern.

Die Korngrößen der Sohlsedimente und deren Schichtung sollen im untersuchten Abschnitt mit Hilfe von Bohrkernen und Sohlproben ermittelt werden. Die Sohlrauhigkeit ergibt sich indirekt aus der Analyse von sohlnahen Profilen der Strömungsgeschwindigkeit aus Langzeitmessungen eines ADCP-Sensors. Rauhigkeit und Korngrößenverteilung sind nicht nur für die Kalibrierung und Validierung von hydraulischen und Sedimenttransportmodellen nötig, sondern auch, um den möglichen Einfluss auf die maximal erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und die Ruderkräfte zu untersuchen, die vor allem in Situationen mit geringem Flottwasser eine erhöhte Fahrrinnenbreite erforderlich machen könnten.

5. Zukünftige Arbeitsschritte

5.1 Innovative Routenplanungs-und Bahnführungsalgorithmen (Autopilotierung)

Neben der Validierung und Kalibrierung von PeTra2D mit diesen umfassenden Messungen sind Untersuchungen zur Verbesserung des Routenplanungs- und Bahnführungsalgorithmus vorgesehen. Wie im Kapitel 3 beschrieben, verwendet PeTra2D einen kommerziellen Algorithmus für die Steuerung entlang einer vordefinierten Route durch das schrittweise Setzen eines berechneten Ruderwinkels mit Methoden der Regelungstechnik (Sandler, 2005). Die angestrebte Route wird derzeit vorab mit Hilfe des virtuellen Schiffsführers in PeTra1D berechnet (Kap. 3.1). Für die Ermittlung von Fahrrinnenmindestbreiten ist zusätzlich vorgesehen, die Routenplanung weiter wie folgt zu verbessern:

- Der bestehende Bahnführungsalgorithmus in PeTra2D soll durch eine weiterentwickelte Version des Instituts für Systemdynamik (ISYS) der Uni Stuttgart (Lutz, 2009) ersetzt werden. Diese enthält einen anderen Optimierungsalgorithmus, verbesserte Parametersätze für das nautische Verhalten des Schiffs sowie Erweiterungen bzgl. Begegnung und Korrektur des Einflusses von Querströmungen.
- Die derzeitige Kursachsenberechnung mit einem virtuellen Schiffsführer soll zu einer Kursachsenoptimierung erweitert werden, bei der iterativ die Kursachse solange verändert wird, bis die berechnete Schleppfläche unter einem vorgegebenen Maximalwert bleibt. Um in nautisch schwierigen Abschnitten den Verkehrsflächenbedarf nicht zu überschätzen, soll das Bugstrahlruder zukünftig mitmodelliert werden.
- Der Bahnführungsalgorithmus soll ebenfalls um einen Standard-Optimierungsalgorithmus erweitert werden. Dieser optimiert all diejenigen Parameter, die der Schiffsführer bei der Steuerung des Schiffs anhand seiner Erfahrung wählen kann (Drehzahl und Ruderwinkel von Haupt- und Bugstrahlruder, Wechselspiel beider Ruder) im Hinblick auf ver-

schiedene Nutzervorgaben (geringe Schleppfläche, geringster Steueraufwand, Sprit sparen, Zeit sparen etc.). Zur Bemessung von Fahrrinnenmindestbreiten müssen die optimierten Ergebnisse selbstverständlich nachträglich mit geeigneten Sicherheitsabständen beaufschlagt werden.

5.2 Human Factor

Die Ermittlung des technisch möglichen minimalen Verkehrsflächenbedarfs, wie er sich bei aus der vorher beschriebenen Optimierung der Fahrt unter Nutzung von Autopiloten ergibt, ist wichtig, um die Untergrenze der Fahrrinneneinschränkung zu kennen. Für die reale Fahrrinnenbemessung sind Zuschläge erforderlich, die u. a. aus der Tatsache resultieren, dass Binnenschiffe von Menschen gesteuert werden, die nicht immer über alle nötigen Informationen verfügen, die unaufmerksam sein können und sogar Fahrfehler machen (Einfluss des "human factor"), d. h., die Entscheidungen eines menschlichen Schiffsführers werden sich deutlich von denen des virtuellen Schiffsführers unterscheiden. Hinzu kommt, dass das Verhalten des Schiffs sowie das Strömungsfeld nur für ganz bestimmte, in den Modellen abgebildete, Situation genau bekannt sind, die in der Praxis von Fahrsituation zu Fahrsituation abweichen können. Deshalb sind besonders die Sicherheitsabstände abhängig vom sogenannten "human factor".

Im vorgestellten Projekt soll ein möglichst objektives Simulationsverfahren zur Bestimmung derjenigen Zusatzbreiten entwickelt werden, die von menschlichen Einflüssen wie verzögerter Reaktion bis hin zu Steuerfehlern aufgrund von andauerndem Stress während der Fahrt unter andauernden Engpassbedingungen, sowie durch fehlende Erfahrungen bei Fahrt im betreffenden Flussabschnitt oder einer bestimmten Fahrsituation reichen. Dies soll im vorgestellten Projekt in enger Kooperation mit dem Institut für Arbeitsmedizin der Universität Hamburg (ZfaM) geschehen. Die Autoren hoffen, das menschliche Verhalten durch parametrisierte "Mensch-Modelle" beschreiben zu können.

Diese vereinfachten "Mensch-Modelle" sollen in die oben beschriebenen Bahnführungs- und Routenplanungsalgorithmen implementiert werden und so die Simulation von Schiffsfahrten unter möglichst realistischen Bedingungen mit Rücksicht auf Reaktionszeiten, Fahrfehler und unvollkommene Schiffsführer erlauben. Dadurch soll die objektive Bemessung der Fahrrinnendimensionen für Problemstellungen auch ohne ausreichend vorhandene Naturdaten und Erfahrungen in der Strecke ermöglicht werden. Interessante Beispiele für diese Anwendung wären z. B., wenn ein neues Schiff lizenziert werden soll, wenn neue oder veränderte Regelungsmaßnahmen beurteilt werden sollen oder wenn die bestehenden Fahrrinnendimensionen verändert oder optimiert werden sollen.

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel beschreibt eine Kette von notwendigen Schritten, um minimale Fahrrinnenbreiten für die Binnenschifffahrtsstraßen zu dimensionieren. Die Studie konzentriert sich auf einen Abschnitt am Mittelrhein zwischen Mainz und Koblenz, der durch Tiefenengpässe, enge Kurven und navigatorisch schwierige Strömungsteilungen um Inseln gekennzeichnet ist. Um die notwendigen Mindestbreiten zu bestimmen, wurden zunächst Naturuntersuchungen bzgl. Schiffspfad und Verkehrsflächenbedarf analysiert, auch um die wichtigsten Tiefenengpässe im gewählten Flussabschnitt zu ermitteln. Aus diesen Ergebnissen erscheinen Einschränkungen der Fahrrinnenbreite mit Ausnahme von Abschnitten mit engen Kurven möglich. Zusätzlich wurden zwei von der BAW entwickelte fahrdynamische Modelle angewendet. Das eindimensionale Modell PeTra1D ist ein gut validiertes Werkzeug für Trassierungsaufgaben und beinhaltet einen automatischen Routenplanungsalgorithmus. Es ist jedoch auf Flussabschnitte ohne nennenswerte Querströmungen begrenzt. Das zweidimensionale fahrdynamische Model PeTra2D ist ein derzeit noch experimentelles Werkzeug. Die Interaktionen zwischen Schiff und umgebendem Wasser wird aber wesentlich besser beschrieben als in PeTra1D. Vor allem berücksichtigt es den Einfluss von Querströmungen. Es enthält keinen Routenplanungsalgorithmus, dafür aber die Schiffssteuerung durch einen Autopiloten. Messdaten und Modellrechnungen mit PeTra1D und PeTra2D führen zu einem ersten Entwurf einer optimierten Fahrrinne für den betrachteten Abschnitt des Mittelrheins.

Die Modelldaten stimmen grundsätzlich mit den Beobachtungsdaten überein und zeigen, dass es nach heutigem Wissensstand möglich sein könnte, die bestehende Fahrrinne bei vertretbarem Baggeraufwand auf um rund ein Drittel reduzierter Breite, um ca. 2 dm tiefer zu unterhalten, um an Tiefenengpässen während Niedrigwasserphasen lokal größere Wassertiefen zur Verfügung zu stellen.

Die noch ausstehenden Untersuchungen des Projekts beinhalten eine detaillierte Untersuchung des vorgestellten Entwurfs innerhalb eines kurzen Flussabschnitts bei Rüdesheim. Dieses Gebiet ist nach heutigem Wissenstand einer der wichtigsten Tiefenengpässe. In der Untersuchungsstrecke soll die Fahrrinne künstlich durch Bojen verengt werden, um das Verhalten der Schiffsführer durch Verkehrsbeobachtungen, Befragungen und Fahrmanöver mit angemieteten Schiffen zu untersuchen. Darüber hinaus sind umfassende Messungen der hydrologischen und morphologischen Modelleingangsdaten notwendig, um die Berechnungsverfahren zu kalibrieren und zu validieren. Diese umfassen die Sedimenteigenschaften, Geschiebetransport und Messungen des Geschwindigkeitsfelds.

Die theoretische Arbeit konzentriert sich auf Verbesserungen an den bestehenden Modellen, besonderes des Autopiloten, in den z. B. die Verwendung von Bugstrahlrudern und "menschliche Eigenschaften" implementiert werden sollen, um so die notwendigen Sicherheitsabstände objektiver ermitteln zu können. Diese Ergebnisse sollen die sichere und leichte Schifffahrt in einer optimierten Fahrrinne mit - wo möglich - geringerer Breite unterstützten.

7. Literaturverzeichnis

BAW, 2004, Bundesanstalt für Wasserbau: Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, Mitteilungsblatt Nr. 87; Eigenverlag, Karlsruhe 2004.

Dettmann, T. & R. Zentgraf, 2002, Pegelabhängige Fahrspurberechnung in fließenden Gewässern, BAW Mitteilungen 84, 127-140.

Federal Waterways Engineering and Research Institute, 2005, Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways, Bulletin no. 88, August 2005.

Kolarov, P., 2006, Simulation von Schiffsbewegungen im Fliessgewässer, Abschlußbericht, Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik.

Lutz, A., 2009, Optimierung des Verkehrsweges Binnenwasserstraße mit Hilfe automatischer Bahnführung, BAW-Kolloquium, Oktober 2009.

Münch, N., 2007, Weiterentwicklung für ein integriertes Navigationssystem für Binnenschiffe, Informationsschrift WSD-SW, Seite 76-80.

Sandler, M., 2005, Bahnregler für Binnenschiffsmodelle, IN-Innovative Navigation GmbH, unveröffentlicht.

Söhngen, B., Kellermann, J. & Witte, H.-H., 1998, Investigations concerning Danube river engineering works to improve navigation, restricted by requirements of water resources, flood control and ecology; ICERD-Conference, Budapest, April

Söhngen, B., 2001, Three aspects of ship waterway interaction in gravel bed rivers: bed unevenness and fairway cross sections, keel clearance for coarse sediments and ship induced bed load; 166è seccion du COMITE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE de la Sociètè Hydrotechnique de France; Gestion des sèdiments: de la source à la mer; Lyon, März 2001 und "La Houille Blanche" 8-2001.

Wurms, S. P., Schröder, M., Weichert, R. B. & Wassermann, S., 2010, Strategies to overcome the possibly restricted utilisation of fairways due to climate changes, Proceedings River Flow Conference 2010, (in press).

8. Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen wurden im Projekt 4.04 "Bestimmung von Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt" im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS (www.kliwas.de) durchgeführt, das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) finanziert wird.

Die Autoren danken Sven Wurms (BAW), der die hydrologischen 2D-Eingangsdaten für die fahrdynamischen Modelle zur Verfügung gestellt hat.

Verfasser

Dipl.-Met. Stefanie Wassermann Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe Telefon: 0721/9726-2820 E-mail: stefanie.wassermann@baw.de

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Söhngen Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe Telefon: 0721/9726-4600 E-mail: bernhard.soehngen@baw.de

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

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe Telefon: 0721/9726-3000 E-mail: christoph.heinzelmann@baw.de