

### Modellierung und Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen

**Dipl.-Phys. Nicolas Fischer**

TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr,  
Dresden

**Dr. Martin Treiber**

TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr,  
Dresden

**Dr.-Ing. Bernhard Söhngen**

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein mikroskopisches Modell des Binnenschiffsverkehrsflusses präsentiert und zur Simulation des einfachen Szenarios einer Binnenwasserstraße mit einer Engstelle angewendet. Das Modell besteht aus (i) einem physikbasierten Teilmodell, welches die Schiffsdynamik im freien Verkehrsfluss beschreibt, (ii) einem weit verbreiteten Fahrzeugfolgmodell für einander folgende Schiffe und (iii) Entscheidungs-Teilmodellen, welche Begegnungen und Überholmanöver behandeln. Situationsabhängig setzt sich das "Schiffs-Folgmodell" über die physikbasierten Komponenten und die Entscheidungsmodelle über beide hinweg. Die Entscheidungsmodelle wurden mithilfe eines neuen Ansatzes formuliert, der auf einem Vergleich des zur Verfügung stehenden mit dem in der aktuellen Fahr situation benötigten Verkehrsraum beruht. "Human-Factor" Effekte wurden durch einen statistischen Ansatz zur Bestimmung von Zusatzbreiten berücksichtigt. Eine Methode, diese Zusatzbreiten mit Leichtigkeitskategorien zu verknüpfen, wird dargestellt.

Das Modell wurde auf eine einfache, typische Situation angewendet: Zwei verschiedene Schiffstypen befahren einen Flussabschnitt mit einer Engstelle in der Mitte im Begegnungsverkehr. Es stellte sich heraus, dass die Engstellenkapazität stark von der Zusammensetzung des Verkehrs und dem Verkehrsfluss der talfahrenden Schiffe abhängt.

## 1. Einleitung

### 1.1 Motivation und Hintergrund

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde von den Rhein-Außenbezirken der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt der Bundesrepublik Deutschland beauftragt, die Fahrrinnenbreiten des Rheins unterhalb der Staustufe Iffezheim bis zur niederländischen Grenze zu überprüfen und, falls nötig, angepasste Breiten vorzuschlagen. Einer der Hintergründe, neue Untersuchungen durchzuführen, ist die Tatsache, dass die Fahrrinnenbreiten auf dem deutschen Rhein mehr oder weniger historisch gewachsen sind, z.B. um den Verkehr mit großen Flößen zu ermöglichen, und nicht an die sich stetig ändernde Flotte mit allgemein sehr viel größeren, aber besser steuerbaren Schiffen, als in den Jahren in denen die Fahrrinnenbreiten eingeführt wurden, angepasst wurden. Die Fahrrinnenbreiten sind außerdem über weite Abschnitte (mit wenigen Ausnahmen) konstant, z.B. am Oberrhein bis Mainz mit ca. 90 m, am Mittelrhein mit 120 m und flussabwärts von Koblenz mit 150 m, trotz unterschiedlicher Schiffsgrö-

ßen, Flusskrümmungen oder Querströmungen. Das heißt, dass weder die möglichen Verkehrssituationen, d.h. Richtungs- oder Begegnungsverkehr mit Überholmanövern aller erlaubten Schiffstypen, von Abschnitt zu Abschnitt gleich sind, noch dass die Schiffe mit der gleichen Leichtigkeit und Sicherheit (kurz: L&S) fahren können. Diese Situation soll in Zukunft, z.B. durch Anpassung der lokalen Fahrrinnenbreiten, an die Anforderungen moderner Schiffe und existierende und zukünftige Verkehrssituationen, verbessert werden.

Im Vergleich zur heutigen Situation kann dies zu breiteren Fahrrinnen an existierenden Breiten-Engstellen führen. Jedoch sollten betriebswirtschaftliche Aspekte, Anforderungen der Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt, sowie ökologische und volkswirtschaftliche Aspekte, beim Fahrrinrendesign angemessen berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang müssen die möglichen Behinderungen der Schifffahrt im Falle von unzureichenden Fahrrinnenbreiten für die größten Schiffe und angestrebten Verkehrssituationen bewertet werden. Diese Behinderungen sind die Verringerung der möglichen Schiffsgeschwindigkeiten und – noch wichtiger – die Wartezeiten vor Engstellen. Dies ist die Aufgabe der Untersuchungen der BAW, welche hier vorgestellt und u.a. vom Lehrstuhl für Verkehrsökonomie und -statistik der TU Dresden ausgearbeitet werden. Sie sind Teil einer dreiteiligen Untersuchung:

- Zunächst wurden die existierenden Schifffahrtsbedingungen unter besonderer Berücksichtigung kritischer Situationen und Verkehrsstatistiken an einigen typischen Engstellen des Rheins durch Videobeobachtungen und Auswertung von AIS-Daten untersucht (BAW, zusammen mit dem Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen).
- In einem zweiten Schritt wurde der benötigte Raumbedarf ausgewählter Schiffstypen bei verschiedenen Abladetiefen und Pegelständen durch GPS-Messungen beobachtet und von der BAW insbesondere mit Blick auf die Zusatzbreiten in Kurven, bei Querströmungen und den "Human-Factor" betreffend analysiert. Diese wurden unter Berücksichtigung von schiffahrtlichen Simulationsmethoden extrapoliert, um die technisch notwendigen Fahrrinnenbreiten in ausgewählten Bemessungsfällen zu bestimmen. Dieser Ansatz basiert auf vorhergehenden Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen auf dem bekannten Mittelrheinabschnitt zwischen Mainz und St. Goar, insbesondere um Fahrrinnen zu vertiefen. Dies kann an Tiefenengstellen mit weniger Aufwand erreicht werden, wenn die Fahrrinne schmaler ist. Das Forschungsprojekt KLIWAS, "Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt", in welchem z.B. Maßnahmen zur Abschwächung negativer Effekte des Klimawandels gesucht wurden (Wassermann et al. 2010, Söhngen & Paprocki, 2013), führte zu mehreren semi-empirischen Formeln zur Berechnung der verschiedenen Anteile des Breitenbedarfs von Schiffen auf einem Fluss. Diese werden in Abschnitt 2.1 näher beschrieben.

- Der dritte Schritt der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Modells zur Verkehrssimulation, um die genannte Behinderung der Schifffahrt an Breitenengstellen zu untersuchen. Die Anwendung vereinfachter und daher schneller Berechnungsverfahren in der Verkehrssimulation ist nötig, um eine große Zahl von Simulationsläufen zu ermöglichen, z.B. um mögliche Konflikte zu prüfen und in Analogie zu echten Schiffsführern zu lösen, aber auch zur Berechnung einer großen Zahl von Situationen über einen langen Zeitraum, um Verkehrsstatistiken zu generieren und auf diesem Weg Zufallseffekte auszuschließen.

### 1.2 Verkehrssimulation

Ähnlich zu der Situation im Straßenverkehr haben Engstellen auf engen, stark befahrenen Binnenwasserstraßen einen großen Einfluss auf den Betrieb von Schiffen. Engstellen auf Binnenwasserstraßen umfassen nicht nur statische Engstellen, wie Schleusen oder enge Passagen, sondern auch dynamische Engstellen die von verschiedenen Faktoren wie Schiffsgröße, Geschwindigkeit, Kurven und dem Fahrrinnenprofil abhängen. Diese werden durch die dynamische Berechnung der von jedem Schiff benötigten Fläche mit den von Söhngen & Paprocki (2013) beschriebenen und durch VBW (2013) veranschaulichten Methoden beschrieben. Durch den Vergleich des benötigten mit dem zur Verfügung stehenden Platz können Engstellen, die vom Zustand der beteiligten Schiffe abhängen, erkannt werden. Weiterhin werden genäherte Bewegungsgleichungen für einzelne Schiffe auf einem frei fließenden Fluss, abgeleitet von einem physikbasierten Modell, von Wassermann et al. (2010) vorgestellt.

Aktuelle Simulationen von Binnenschiffsverkehr legen den Schwerpunkt auf statische Engstellen, insbesondere Schleusen und deren Betriebseigenschaften wie Betriebszeiten. Dai, M. & Schonfeld, P. (1993) präsentieren ein mikroskopisches Modell mit Schwerpunkt auf Verzögerungen durch Variationen in Schleusenzeiten. Reisezeiten zwischen Schleusen werden durch die Annahme konstanter Geschwindigkeiten approximiert. Faktisch ist ihr Modell eine Anwendung der Warteschlangentheorie.

Ein mikroskopisches Modell mit Schwerpunkt auf Seeschiffen, die den Hafen von Antwerpen in Belgien durch eine Zahl von Schleusen anlaufen und verlassen, wird von Thiers, G.F. & Janssens, G.K. (1998) präsentiert. Es beinhaltet Interaktionen zwischen Schiffen wie bei Kreuzungen und Überholmanövern und allgemeine Schifffahrtsregeln.

Nach unserem Wissen wurden bisher weder Modelle noch Simulationstools für einen physikalisch realistischen Verkehrsfluss auf frei fließenden Flüssen veröffentlicht. Ein solches Modell sollte nicht nur die physikalisch basierte Bewegung eines einzelnen Schiffes in Gegenwart einer statischen oder dynamischen Engstelle beschreiben. Es muss außerdem Wechselwirkungen mit anderen Schiffen wie Begegnungen, Überholmanöver oder antizipative Verzögerung, um eine kritische Begegnung in oder in der Nähe einer Engstellen zu vermeiden, beinhalten. Ergänzend zu den physikalischen Kräften ergeben solche Wechselwirkungen

"soziale Kräfte", welche die physikalischen Bewegungsgleichungen erweitern oder ersetzen.

Während unseres Wissens keine dynamischen Interaktionsmodellen für den Binnenschiffsverkehr existieren, gibt es solche Modelle für den Fußgängerverkehr ("social force model" von Helbing, D. (2001)) und Autoverkehr. In letzterem wird die longitudinale Dynamik durch Fahrzeugfolgemodelle beschrieben, die transversale Dynamik durch Spurwechselmodelle (siehe, z.B., Treiber, M. & Kesting, A. (2013)). Beispiele von Fahrzeugfolgemoellen, die für eine Verallgemeinerung auf den Verkehr auf Wasserstraßen geeignet sind, sind das Intelligent-Driver Model (IDM) von Treiber, M. et al. (2000) oder eine Erweiterung davon, das "Improved IDM" (IIDM) von Treiber, M. & Kesting, A. (2013).

In diesem Artikel schlagen wir ein dynamisches mikroskopisches Modell für den Verkehrsfluss auf Binnenwasserstraßen vor, in dem wir die physikbasierten Bewegungsgleichungen und die Modelle für dynamischen Engstellen von Söhngen et al. (2014) mit einem IIDM-basierten "Schiffsfolgemoell" und neu entwickelten Entscheidungsmodellen für Begegnungen und Überholmanöver verbinden.

Wir simulieren multimodalen Begegnungsverkehr im Bereich einer Engstelle und zeigen, wie das Modell verwendet werden kann, um Engstellen zu identifizieren, Kapazitäten abzuschätzen, benötigte Fahrrinnenbreiten und -tiefen abzuschätzen und Empfehlungen für maximale Schiffsgrößen zu ermitteln.

In Abschnitt 2 führen wir das Modell ein. In Abschnitt 3 beschreiben wir die Simulation von Engstellen mit Begegnungsverkehr und untersuchen den Einfluss verschiedener Schiffstypen und relativer Verkehrsnachfragen auf die Engstellenkapazität. Im abschließenden Abschnitt 4 diskutieren wir die Ergebnisse und zeigen Ansätze für zukünftige Forschungsvorhaben auf.

### 2. Modellbeschreibung

Wir nutzen einen eindimensionalen mikroskopischen Ansatz, um den Verkehrsfluss auf Binnenwasserstraßen zu simulieren. Das bedeutet, dass jedes Schiff als individuelles Objekt mit Attributen wie Schiffstyp, -maßen, maximaler Leistung oder Tiefgang und dynamischen Variablen wie Richtung, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position simuliert wird. Die Bewegungsgleichungen jedes Schiffes beinhalten physikalische Gesetzmäßigkeiten und Begrenzungen, die im physikalischen Teilmodell (vgl. Abschnitt 2.1) spezifiziert sind. Die Gleichungen beinhalten außerdem Interaktionen mit anderen Schiffen in Form eines Verhaltens-Teilmodells für den Schiffsführer, mit dem Zweck eine schnelle und effiziente Passage zu ermöglichen und kritische Situationen zu vermeiden (vgl. Abschnitt 2.2).

Wir definieren verschiedene Verkehrssituationen wie freien und gebundenen Verkehr, sowie Überholmanöver und Begegnungen. Einige dieser Situationen können zeitgleich auftreten, aber jede wird von einem bestimmten Teil des Verkehrsmodells beschrieben. Freier Verkehr beschreibt die Situation in der ein Schiff nicht durch das Verhalten eines anderen Schiffes beeinträchtigt wird. Wenn ein Schiff aufgrund eines voraus-

fahrenden Schiffes seine Fahrt verlangsamen muss, reden wir von gebundenem Verkehr. Begegnungen treten auf, wenn sich ein entgegenkommendes Schiff innerhalb eines festgelegten Radius ("Informationsradius") befindet. Diese Situationen treten ohne eine aktive Entscheidung des Schiffsführers auf. Die Entscheidung ein vorausfahrendes Schiff zu überholen wird durch ein Anreiz- und ein Sicherheitskriterium beschrieben.

Das Verhaltensmodell selbst besteht aus verschiedenen Komponenten: Einem longitudinalen Beschleunigungsmodell, ähnlich einem Fahrzeugfolgmodell für den Straßenverkehr, und Entscheidungsmodellen um zu bestimmen, ob eine Begegnung mit entgegenkommenden Schiffen sicher oder ob ein Überholmanöver gewünscht und sicher ist. Die Entscheidungs-Teilmodelle interagieren mit dem Longitudinalmodell, indem sie die Beschleunigung während Begegnungen oder Überholmanövern anpassen. Alle Sicherheitskomponenten des Verhaltensmodells basieren auf den dynamischen Flächen, die jedes Schiff für eine sichere Fahrt benötigt. Diese werden durch longitudinale Sicherheitsabstände und minimale seitliche Abstände beschrieben, die auf dem dynamischen Zustand des Schiffes (Geschwindigkeit, Richtung), auf der Flussgeometrie und dem Strömungsprofil basieren. Die letztgenannten sind in Abschnitt 2.1 beschrieben. Für jede Kombination von Schiffsgeschwindigkeiten kann der benötigte und zur Verfügung stehende Platz berechnet werden. Durch Diskretisierung der Geschwindigkeiten und Positionen auf dem Fluss können die Engstellen für verschiedene Szenarien im Voraus berechnet werden.

Anstelle einer vollen zweidimensionalen Bewegung simulieren wir die longitudinale Bewegung unter der Annahme, dass das Schiff lateral einer gegebenen Kursachse folgt, d.h. wir wenden effektiv ein eindimensionales Modell an. Die gesamte laterale Dynamik sowie die Beschränkungen (z.B. beim Überholen oder Begegnen) sind im Entscheidungs-Teilmodell enthalten.

Die "Human-Factor" Effekte werden berücksichtigt

- (1) durch die Nutzung eines beschränkten Informationsradius, das heißt, der Reichweite innerhalb der der Schiffsführer Informationen über andere Schiffe bekommt,
- (2) durch verschiedene Schiffsführer mit unterschiedlichen nautischen Kenntnissen, persönlicher Fitness oder Mentalität, die die Entscheidung bei der Konfliktvermeidung beeinflussen (z.B. vor einer Engstelle zu warten oder eine geringere Leichtigkeit zu akzeptieren) und
- (3) durch eine empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung von menschlich bedingten Zusatzbreiten.

Letztere sind Teil der semi-empirischen Gleichungen, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden. Mögliche Konflikte können während der Simulation nicht in jedem Fall gelöst werden – selbst wenn es numerisch möglich wäre, da es sich in diesem Fall um einen künstlich gesteuerten Verkehr und nicht um reale Verkehrssituationen handeln würde. Ungelöste Konflikte beruhen insbesondere auf dem gewählten Informationsradius. Dieser kann mit dem gewählten Schiffsführertyp verknüpft und zufällig variiert werden. Nach der Simulation müssen die ungelösten Konflikte, unter Berücksichtigung

der benötigten Breiten, um eine Havarie zu vermeiden, z.B. durch sehr aufmerksames Fahren (Reduktion der menschlich bedingten Zusatzbreite) oder durch Einsatz des Bugstrahlruders (wenn möglich), bewertet werden.

Unter Berücksichtigung dieser Bewertungsstufen wird die Schwierigkeit des Manövers und dadurch die reale Leichtigkeit in jeder kritischen Situation ein. Dies erlaubt dem Nutzer der Verkehrssimulation, die Notwendigkeit von Fahrinnenverbreiterungen anhand der Wahrscheinlichkeit kritischer Situationen zu beurteilen. Die Zuweisung einer bestimmten Situation zu einer Leichtigkeitsskategorie kann nach PIANC INCOM WG 141 (Deplaix & Söhngen, 2013, Söhngen 2013) vorgenommen werden. Ein erster Entwurf einer möglichen Zuordnung ist in Abschnitt 2.1.3 gegeben.

### 2.1 Das Physik-Modell

Wie zuvor erwähnt ist es nicht praktikabel, detaillierte nautische Simulationen wie die aus Schiffsführungssimulatoren in Verkehrssimulationen zu verwenden, insbesondere den benötigten Flächenbedarf betreffend. Einer der Gründe, wie oben angedeutet, ist die hohe Rechenzeit dieser Simulationstechniken. Aber selbst wenn die Rechenzeiten sehr viel kürzer wären, ist es beim gegenwärtigen Stand der Modellierungstechnik nahezu unmöglich, ein Schiff mit einem Autopiloten realistisch in einem zweidimensionalen Gebiet zu steuern und dabei das aktuelle Fahrwasser, die Fahrzeugdynamik und die Verkehrssituation zu berücksichtigen. Daher sind im derzeitigen Stadium von Rechenanlagen und Wissen Vereinfachungen nötig:

1. Nutzung von Querprofilen in 100 m Abständen, um das verfügbare Fahrwasser zu definieren, die Wassertiefen, Längs- und Querströmungsgeschwindigkeiten sowie ihre Verteilung über den Querschnitt – wie im Fall der Anwendung eines eindimensionalen Strömungsmodells. Auf dieser Basis können die möglichen Abladetiefen, Schiffsgeschwindigkeiten und benötigten Flächen berechnet werden.
2. Verwendung von gemittelten Kursachsen und entsprechenden Kurvenradien, welche üblicherweise aus Naturdaten für alle relevanten Schiffstypen (Klassen Va, Vb und VI), Abladezustand (leer oder beladen) und Fahrtrichtung (zu Berg, zu Tal) kommen.
3. Nutzung von semi-empirischen Formeln, abgeleitet aus Naturdaten und fahrdynamischer Theorie, welche alle deterministischen Einflüsse auf (a) longitudinale und (b) seitliche Bewegung des Schiffes betreffen, wie
  - (a) Schiffswiderstand und benötigte Maschinenleistung, abhängig von Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser, kritischer Schiffsgeschwindigkeit, Fahrtrichtung, Fließgeschwindigkeit, Flussbett-Rauheit und longitudinaler Wasserspiegelneigung, um die Schiffsgeschwindigkeit

für eine gewählte Maschinenleistung zu berechnen (Wassermann et al. 2010),

- (b) Schiffsabmessungen, Zusatzbreiten in Kurven eines driftenden Schiffes mit und ohne Bugstrahlrudernutzung, Zusatzbreiten, um Querströmungen und Seitenwind entgegenzuwirken, Zusatzbreiten, die benötigt werden, um Manöver wie Begegnungen und Überholmanöver durchzuführen oder um nahe an Ufer oder Buhnen zu fahren.
- 4. Nutzung vereinfachter Formeln, um Zusatzbreiten aufgrund von Instabilitäten des Schiffs-kurses, Fähigkeiten oder Unaufmerksamkeit des Schiffsführers ("Human-Factor"), die aus Natur- oder Modelldaten abgeleitet und im Allgemeinen statistisch verteilt sind (Söhngen & Rettmeier 2013).

Im Folgenden werden zwei wichtige Beiträge zu den benötigten Breiten, neben der Breite des Schiffes, detailliert betrachtet: Die Zusatzbreite in Kurven mit und ohne Bugstrahlruder (Abschnitt 2.1.1) und die Zusatzbreite in der Nähe von Buhnen (Abschnitt 2.1.2). Außerdem wird in Abschnitt 2.1.3 ein Ansatz zum Umgang mit "Human-Factor" Effekten vorgestellt.

### 2.1.1 Zusatzbreite in Kurven ohne Nutzung des Bugstrahlruders

Wenn der Schiffsführer keine aktiven Kräfte mobilisieren kann, wie die aus einem Bugstrahlruder, um die Zentrifugalkraft und Sekundärströmungen auf fließenden Flüssen direkt zu kompensieren, muss das Schiff einen Driftwinkel gegen die seitliche Abdrift einnehmen. In einem Gleichgewichtszustand werden die zentrifugalen Kräfte durch die Querkräfte auf das driftende Unterwasserschiff genau kompensiert. Da die Driftkräfte im Allgemeinen über die Länge des Schiffes nicht konstant sind, müssen die entsprechenden Drehmomente ebenfalls kompensiert werden, hier durch entsprechende Ruderkräfte. Tatsächlich bestimmt die Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser  $v_{sw}$ , welche die mögliche Querkraft auf das Unterwasserschiff durch Driften skaliert, zusammen mit dem Tiefgang  $T$  und der Wassertiefe  $D$ , abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund, welche die Zentrifugalkraft skaliert, den nötigen Driftwinkel  $\beta$  und damit die Zusatzbreite in Kurven  $\Delta b_K$ . Diese hängt nach den geometrischen Überlegungen in Abb. 1, mit der relativen Position des Schiffsdrehpunktes  $c_F$  zusammen.

Dies führt zu der folgenden Näherungsgleichung, die gilt, wenn die Länge  $L$  des Schiffes klein im Vergleich zum Kurvenradius  $R$  ist. Die Gleichung zeigt den starken Einfluss von  $c_F$  und  $L$  auf die Zusatzbreite:

$$\Delta b_K \approx \frac{1}{2} c_F^2 \frac{L^2}{R} \quad (1)$$

Der Parameter  $c_F$  ist als Position des Drehpunktes, gemessen von Heck zu Bug, an dem die Schiffsachse

tangential an der Kurve liegt, geteilt durch die Schiffslänge  $L$  definiert. Er hängt stark von  $T/D$  ab, mit kleineren  $c_F$  im Fall von großen  $T/D$ , weil das Wasser im Fall von wenig Platz unter dem Kiel gezwungen ist, sich unter dem Schiff "durchzupressen", was zu großen Querkräften beim Driften führt. Leere Schiffe mit kleinem  $T/D$  vergrößern dagegen den  $c_F$ -Wert und damit die Zusatzbreite in Kurven. Zusammen mit großen Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{Flow}$  in der Talfahrt, da diese bei gleicher Geschwindigkeit relativ zum Wasser die Zentrifugalkräfte vergrößert, führt dies zu größeren benötigten Driftwinkeln um diesen vergrößerten Kräften entgegenzuwirken. Das Ergebnis ist ein starker Einfluss von  $v_{Flow}/v_{sw}$  auf  $c_F$  wie es in Abb. 2 für ein Schiff der Klasse Va dargestellt ist.

Abbildung 2 basiert auf der Theorie des Kräftegleichgewichts, wobei nicht nur Zentrifugal-, Drift- und Ruderkräfte betrachtet werden, sondern auch der Einfluss der Wasserspiegel-Querneigung. Letztere unterstützt das Schiff dabei, bei einer Kurvenfahrt im Gleichgewichtszustand auf Kurs zu bleiben. Es kann jedoch vorkommen, dass der Schiffsführer den Driftwinkel einnimmt, bevor er in die Kurve einfährt. In diesem Fall existiert die Neigung des Wasserspiegels noch nicht und die entsprechenden unterstützenden Kräfte sind nicht relevant. Dieser Effekt ist indirekt in Abb. 2 beteiligt, da die Parameter der Theorie, die die Querneigung und die Koeffizienten der Kräfte auf das Unterwasserschiff beinhalten, anhand vieler Messungen in deutschen Kanälen und Flüssen kalibriert wurden. Infolgedessen können die gezeigten  $c_F$ -Werte im Fall von Schiffen, die den Driftwinkel kurz vor der Kurve aufnehmen, etwas größer sein (Unsicherheitsbereich ungefähr  $\pm 0.1$ ) und kleiner im Fall einer Gleichgewichtssituation.

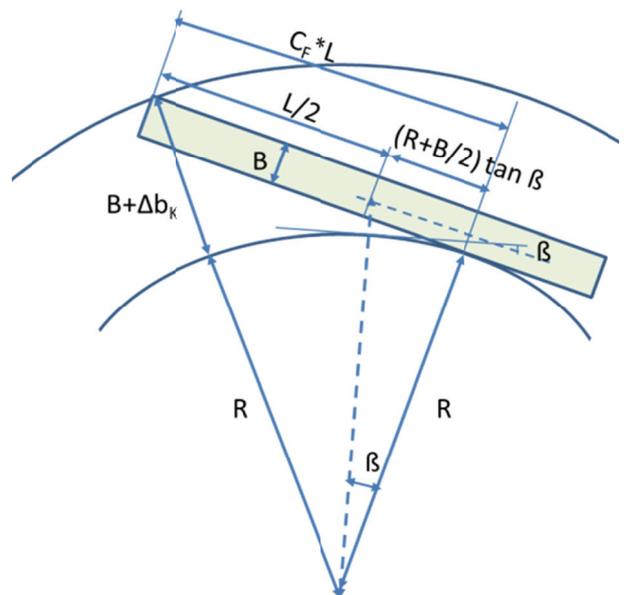
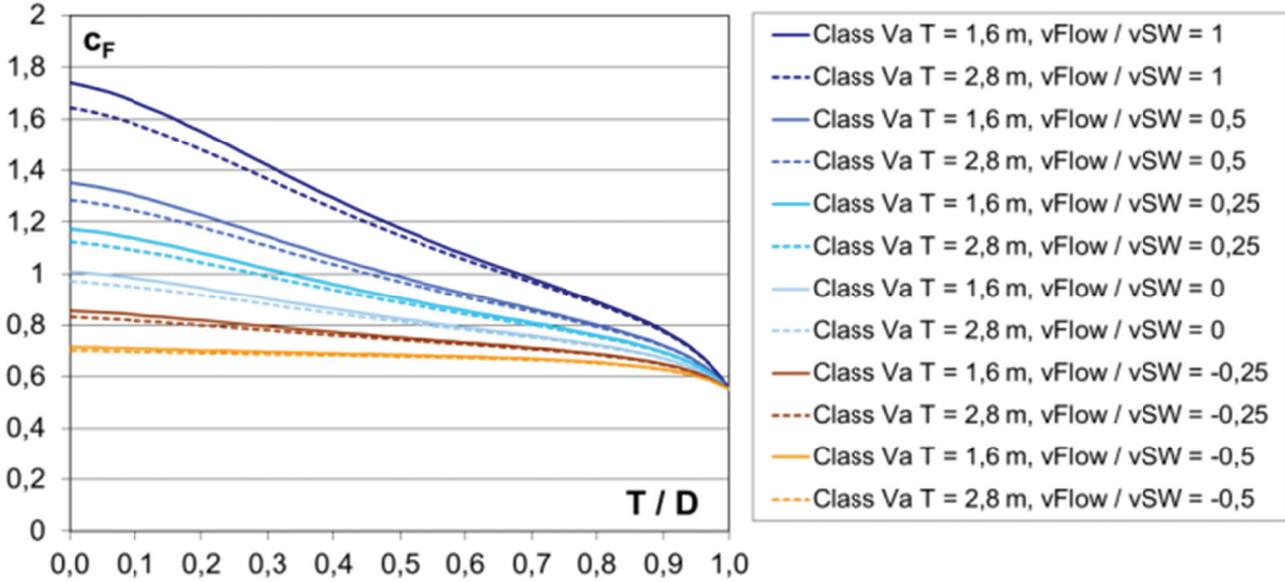


Abbildung 1: Skizze zur Definition der Zusatzbreite  $\Delta b_K$  im Gleichgewichtszustand.



**Abbildung 2:** Einfluss von Tiefgang zu Wassertiefen-Verhältnis  $T/D$  und Fließgeschwindigkeit  $v_{Flow}$  (Vorzeichen: - zu Berg und + zu Tal), im Verhältnis zur Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser  $v_{sw}$  auf den  $c_F$ -Wert (ohne Bugstrahlruder, keine Sekundärströmung), berechnet für ein Schiff der Klasse Va ( $L = 110\text{m}$ ,  $B = 11.45\text{m}$ ).

Die semi-empirischen Gleichungen hinter Abb. 2 sind unten gezeigt. Sie nutzen für die Driftkräfte (Terme mit  $c_{D,max}$  und  $c_{D,0}$ , Parameter  $c^*$ ,  $\beta$ ,  $\beta_c$ ) den Ansatz von UFC (2005) und die Theorie schlanker Körper, um die so genannten instabilen Momente zu berücksichtigen (Terme mit  $c_{m,hy}$  und Parameter  $c_i$ ), unter der Verwendung empirischer Gleichungen zur Approximation des  $T/D$  Einflusses auf die hydrodynamische Masse des Schiffes (Term  $f_1$ ). Den Einfluss der quergerichteten Wasserspiegelneigung betreffend sagt die Theorie aus, dass die entsprechende unterstützende Kraft im Fall einer quasi-Gleichgewichtssituation betragsmäßig die gleiche ist, wie die Zentrifugalkraft eines Schiffes, das mit der Strömung driftet ( $v_{sw} = 0$ ), d.h. mit der umgebenden Fließgeschwindigkeit zu Tal fährt, da das Wasser des Strömungsfeldes in gleicher Weise durch die Steigung unterstützt wird. Diese Theorie führt zu einem Koeffizienten von  $f_{v,2} = 0$  in der Gleichung für  $f^{(1)}$ , zusammen mit  $c_c = 1$ . Wenn es keine seitliche Steigung gibt, ergibt die Theorie  $f_{v,2} = 1$  und  $c_c = 1$ , aber die Naturdaten führen zu  $f_{v,2} = 0.3$  und  $c_c = 1.5$ . Daher ist die beobachtete unterstützende Wasserspiegelquerneigung im Mittel kleiner als erwartet, d.h. die aus Messungen abgeleiteten  $c_F$ -Werte sind größer als die aus der Theorie bei voll ausgebildeter Wasserspiegelquerneigung.

$$c_F = \frac{1}{2} + c_i \frac{B}{L} + \frac{\frac{2}{c_{D,max}} \frac{B}{L} \frac{\gamma}{\gamma_L} c_c f^{(1)} + \frac{1}{6}}{\frac{c_{m,hy}}{c_{D,max}} \frac{B}{L} \frac{\gamma}{\gamma_L} 4 k' + 1} + \Delta c_{FS} \quad (2)$$

$$c_{m,hy} = f_4(f_3 f_2 + f_1), f_1 = \frac{T/D}{1-T/D}, f_2 = 1 + 0,35 \ln\left(\frac{B}{T} + 1\right), f_3 = \frac{\pi T^2}{2TB + 0,2T^2}, f_4 = \frac{TB + 0,2T^2}{TB} \quad (3)$$

$$k' = 1 - 3,4^{-0,22\left(\frac{L}{B}-1\right)}, f^{(1)} = \left(1 + 2 \frac{v_{Flow}}{v_{sw}}\right) + f_{v,2} \left(\frac{v_{Flow}}{v_{sw}}\right)^2 \quad (4)$$

$$c_{D,max} = c_{D,0} + (c^* - c_{D,0}) \left(\frac{T}{D}\right)^\beta, c_{D,0} = 0,22 \left(\frac{L}{\gamma B}\right)^{\beta_c} \quad (5)$$

Koeffizienten:  $\beta_c = 0.5$ ,  $\beta = 2.0$ ,  $\gamma = 0.85$ ,  $\gamma_L = 0.9$ ,  $f_{v,2} = 0.3$ ,  $c^* = 3.2$ ,  $c_c = 1.5$ ,  $c_i = 0.5$

Diese Formeln basieren auf einigen Vereinfachungen die die Rumpfform des Schiffes und die Ruder betreffen. Daher wurde ein Korrekturparameter  $\Delta c_{FS}$  eingeführt. Vergleiche mit Naturdaten zeigen, dass er um  $\pm 0.1$  variiert. Im Mittel sind für Schiffe der Klassen Va und Vb, die kein aktives oder passives Bugstrahlruder nutzen, keine Korrekturen notwendig.

Der Vollständigkeit halber sollte erwähnt werden, dass Abb. 2 und die Gleichungen ohne den Einfluss von Sekundärströmungen in Kurven gelten. Diese zwingen den Steuermann zum Ausgleich einen zusätzlichen seitlichen Driftwinkel anzunehmen. Unter der Annahme, dass die entsprechende seitliche Bewegung des Schiffes die gleiche ist wie die Querströmungsgeschwindigkeit der Sekundärströmung, gemittelt über den Tiefgang des Schiffes, führt dies zur folgenden Gleichung, um  $c_F$  um den Einfluss der Sekundärströmungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Dabei wird eine lineare Verteilung der Sekundärströmungsgeschwindigkeit über die Tiefe und ihre Größe aus geeigneten hydraulischen Modellexperimenten in Flusskrümmungen (Yee-Chung 1990) angenommen:

$$\Delta c_F \approx c_S \frac{D}{L} \left(1 - \frac{T}{D}\right) \frac{|v_{Flow}|}{v_{sw}}, c_S \approx 5.9 \quad (6)$$

Vergleiche zwischen berechneten und beobachteten  $c_F$  zeigen außerdem, dass der Einsatz des Bugstrahlruders helfen kann, den  $c_F$ -Wert und damit die Zusatzbreite signifikant zu reduzieren, allerdings nur im Fall moderater Schiffsgeschwindigkeiten und starker Bugstrahlruder. Die Theorie, die diese Effekte berücksichtigt ist kompliziert und führt zu keinen für die Verkehrssimulation geeigneten Formeln. Jedoch ist die Forschung in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen. Messungen zeigen, dass der  $c_F$ -Wert durch die Nutzung eines angemessenen Bugstrahlruders um  $\Delta c_F$  0.1 bis zu 0.2 reduziert werden kann. Diese einfache Erfahrungsregel wird als ein erster Ansatz in der Verkehrssimulation genutzt.

### 2.1.2 Zusatzbreiten bei Buhnen

Der frei fließende Rhein wird hauptsächlich durch Buhnen geregelt. Wenn diese fachgerecht entworfen sind, insbesondere wenn das Verhältnis von Buhnenabstand  $s_G$  zu -länge  $l_G$  zwischen 1 und 2 liegt, wird die Strömung entlang der Buhnenköpfe geführt und turbulente Fluktuationen werden begrenzt. Dennoch können, insbesondere am Anfang und am Ende von Buhnenfeldern und an einigen historisch gewachsenen Buhnenfeldern mit größeren  $s_G/l_G$  Verhältnissen, unregelmäßig auftretende und sich ablösende Makrowirbel, insbesondere an Buhnenköpfen, zusammen mit dem zeitlich gemittelten Strömungsfeld entlang der Buhnen, zu signifikanten Querströmungsgeschwindigkeiten führen, wie in Abb. 3 (links) dargestellt. Diese können vom Steuermann hingenommen und nicht durch Manöver ausgeglichen werden, insbesondere in der Talfahrt, da keine Zeit ist, darauf zu reagieren. Dies führt zu einem seitlichen Versatz zum beabsichtigten Schiffskurs und damit zu einer entsprechenden Zusatzbreite. In der Bergfahrt ist die Einwirkdauer der Querströmung sehr viel größer und es macht Sinn, einen Driftwinkel entgegen der Querströmung einzunehmen. Aber auch dieser Driftwinkel vergrößert den benötigten Platz.

Aus der Analyse von Modellversuchen mit verschiedenen Buhneneigenschaften (Länge  $l_G$ , Abstand  $s_G$ , Wassertiefe, Buhnenhöhe über Grund), hat die BAW statistische Analysen der turbulenten Mischungsweglänge bzw. Wirbelgrößen und entsprechenden veränderlichen

Querströmungen in der Nähe von Buhnen, überwiegend abhängig von dem Verhältnis  $s_G/l_G$  und dem Abstand der Kursachse des Schiffes von den Buhnenköpfen (Söhngen et al., 2014), durchgeführt. Durch die Nutzung gemittelter Werte der Querströmungsgeschwindigkeiten können Formeln zur Berechnung der Zusatzbreite in Querströmungsfeldern verwendet werden, die aus Schiffsführungs-Simulationen stammen (Söhngen et al., 2012). Für ein gegebenes  $s_G/l_G$  Verhältnis und für Wasserstände unter den Buhnenköpfen, skalieren die entsprechenden Zusatzbreiten überwiegend mit der Strömungsgeschwindigkeit (je größer desto größer) und der Schiffsgeschwindigkeit (je größer desto kleiner), mit großen Werten für langsame Bergfahrten und kleineren für eine schnelle Talfahrt, insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Einflusszeiten.

Im Gegensatz verursacht die schiffsinduzierte Absenkung des Wasserstands eine Strömung aus dem Buhnenfeld in Richtung des Schiffes, wie in Abb. 3 (rechts) gezeigt. Diese schiffsinduzierte Querströmung führt durch die größere Wasserspiegelabsenkung bei größeren Schiffsgeschwindigkeiten relativ zum Wasser zu einer entsprechend größeren Zusatzbreite. Dies ist in Abb. 4 an für den Rhein typischen Randbedingungen gezeigt.

Die entsprechenden Formeln sind zu kompliziert, um hier vorgestellt und während der Verkehrssimulation genutzt zu werden, da sie für jede Verkehrssituation angewendet werden müssen. Das heißt: Für jedes Schiff und jedes Querprofil muss jedes mögliche Szenario vor dem nächsten Zeitschritt überprüft werden. Daher werden alle möglichen Zusatzbreiten, abhängig von Schiffstyp, Abladetiefe, Schiffsgeschwindigkeit und Abstand zu den Buhnen (zur Vereinfachung und um auf der sicheren Seite zu liegen kann dieser Abstand für ein Schiff am Rand der Fahrrinne gewählt werden) an allen Querprofilen einmal für diskrete Werte der dynamischen Parameter berechnet und gespeichert.

Das Beispiel in Abb. 4 zeigt, dass die Zusatzbreite bei Buhnen im Fall von großen Strömungs- und Schiffsgeschwindigkeiten größer als die Schiffsbreite sein kann. Die angegebenen Werte sind typisch für einige Rheinabschnitte.



Abbildung 3: Veranschaulichung der turbulenz- (links) und schiffsinduzierten Strömungen (rechts) in der Nähe von Buhnen.

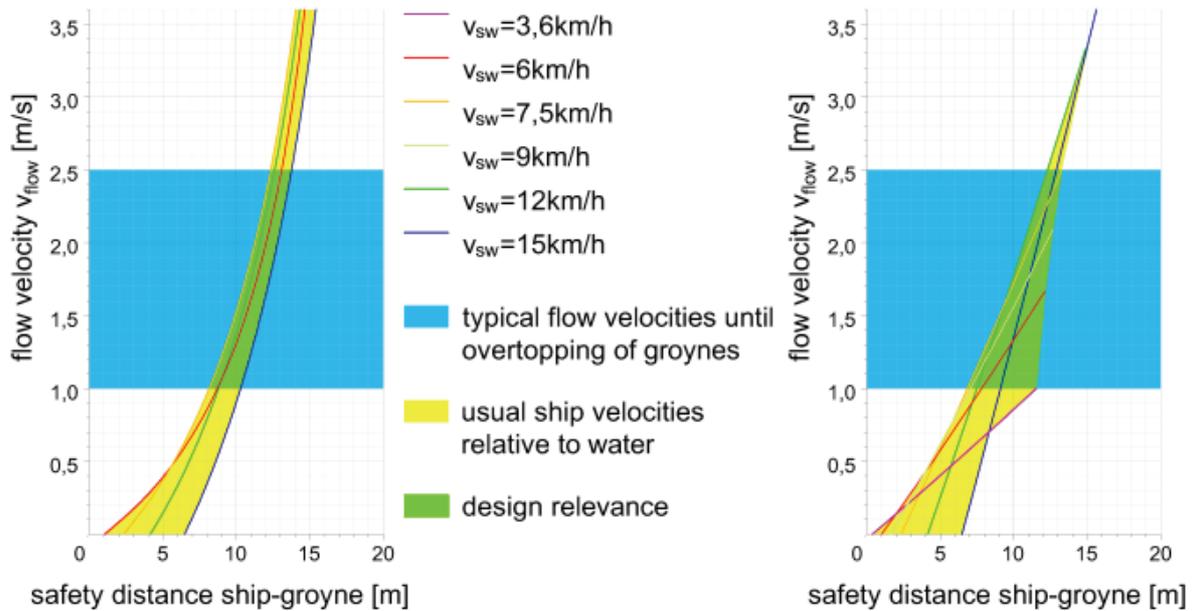


Abbildung 4: Zusatzbreiten für ein voll abgeladenes Schiff der Klasse Va ( $T = 2.8\text{m}$ ) in der Talfahrt (links) und Bergfahrt (rechts) mit verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten relativ zum Wasser  $v_{sw}$ , für typische Randbedingungen des Mittelrheins ( $s_G = 200\text{m}$ ,  $l_G = 100\text{m}$ ,  $v_{Flow} = 0 - 2.5\text{ m/s}$ ), bei mittlerem Wasserstand (Buhnen sind gerade überspült,  $D = 4\text{m}$ ) berechnet.

2.1.3 Ein erster Ansatz zur Berücksichtigung der "Human-Factor" Effekte

Die Zusatzbreite  $\Delta b_i$  spielt eine wichtige Rolle bei der Fahrrinnenbemessung und in der Verkehrssimulation. Sie ist u.a. von der niemals optimalen Orientierung des Schiffsführers abhängig, insbesondere bei Containerschiffen oder Leerfahrern. Sie ist weiterhin Folge einer verzögerten Reaktion auf ungewollte Kursabweichungen, weil das fahrende Schiff stets instabil fährt und deshalb solche Kursabweichungen verstärkt (instabiles Moment) oder allgemein der stets begrenzten Aufmerksamkeit und Fähigkeiten des Schiffsführers ("Human-Factor" Effekte) geschuldet. Modellierungsprobleme resultieren vor allem aus der ausgeprägten statistischen Verteilung dieser Zusatzbreiten  $\Delta b_i$ .

Bei der Betrachtung einer Situation mit Richtungsverkehr zeigen Messungen, dass die Parameter dieser statistischen Verteilung, insbesondere die Abhängigkeit des Mittelwerts und der Standardabweichung, von der Krümmung des Flusses (kleinere Werte auf gerader Strecke), dem Schiffstyp (größere Werte für Containerschiffe oder Tanker), der Fahrtrichtung (zu Tal größer als zu Berg) oder der Schiffsgeschwindigkeit (größer bei höheren Geschwindigkeiten) abhängen. Eine geeignete Formel um diese Effekte zu berücksichtigen ist bisher jedoch noch nicht hergeleitet worden. Ein Grund dafür ist, dass die Daten sehr stark streuen.

Abbildung 5 zeigt dies. Sie zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der  $\Delta b_i$ , abgeleitet aus Naturdaten. Sie wurden überwiegend von modernen, großen Motorschiffen und Schubverbänden, die auf dem Rhein und Neckar fahren, gesammelt. Abbildung 5 beinhaltet alle Messungen ohne Unterscheidung der Randbedingungen. Die zur Ermittlung der  $\Delta b_i$  genutzte Methode ist eine Spektralanalyse der Längs- und Drehbeschleunigung während der Fahrt vieler beobachteter moderner Schiffe. Die Analysemethode erlaubt die Abspaltung der

niedrigsten Frequenzen, die durch zentrifugale Beschleunigungen in Kurven entstehen von denen, die den v.g. "Human-Factor" Effekten zugeordnet werden können, z.B. die Reaktion auf Instabilitäten des fahrenden Schiffes (Söhngen & Rettemeier 2013, Söhngen & Paprocki 2013). Die Kombination der Ergebnisse von Längs- und Drehbeschleunigungen und deren zeitliche Integration ergeben Einzelwerte dieser Zusatzbreiten, die anschließend statistisch analysiert wurden.

Die abgeleiteten Zusatzbreiten  $\Delta b_i$  liegen zwischen 0 und ungefähr 10 m mit einem Mittelwert bei ungefähr 3 m und einem Modalwert von ungefähr 2 m. Das heißt, dass ein guter Schiffsführer in der Lage ist, die Zusatzbreiten durch angemessene Manöver zu limitieren. Ein "typischer hoher Wert", gekennzeichnet durch das 75ste Perzentil von rund 4 m, stimmt gut mit dem Wert in den Deutschen Kanalrichtlinien (BMVBS 2011) für Begegnungsverkehr überein. Ein "typischer Spitzenwert", gekennzeichnet durch das 97ste Perzentil, welches oft für statistische Tests verwendet wird, liegt bei ungefähr 7 m. Auch dieser Wert findet sich in den deutschen Kanalrichtlinien für lange Strecken mit Richtungsverkehr, einem Fahrzustand, dem eine verminderte Aufmerksamkeit des Schiffsführers zugeordnet werden kann. Folglich muss die Zusatzbreite in einer solchen Situation größer als im Fall von Begegnungen sein, die kurze Manöversituationen sind, in denen davon ausgegangen werden kann, dass der Schiffsführer höchst aufmerksam ist. Jedoch kann ein solch hohes Aufmerksamkeitsniveau nicht über lange Zeit gehalten werden.

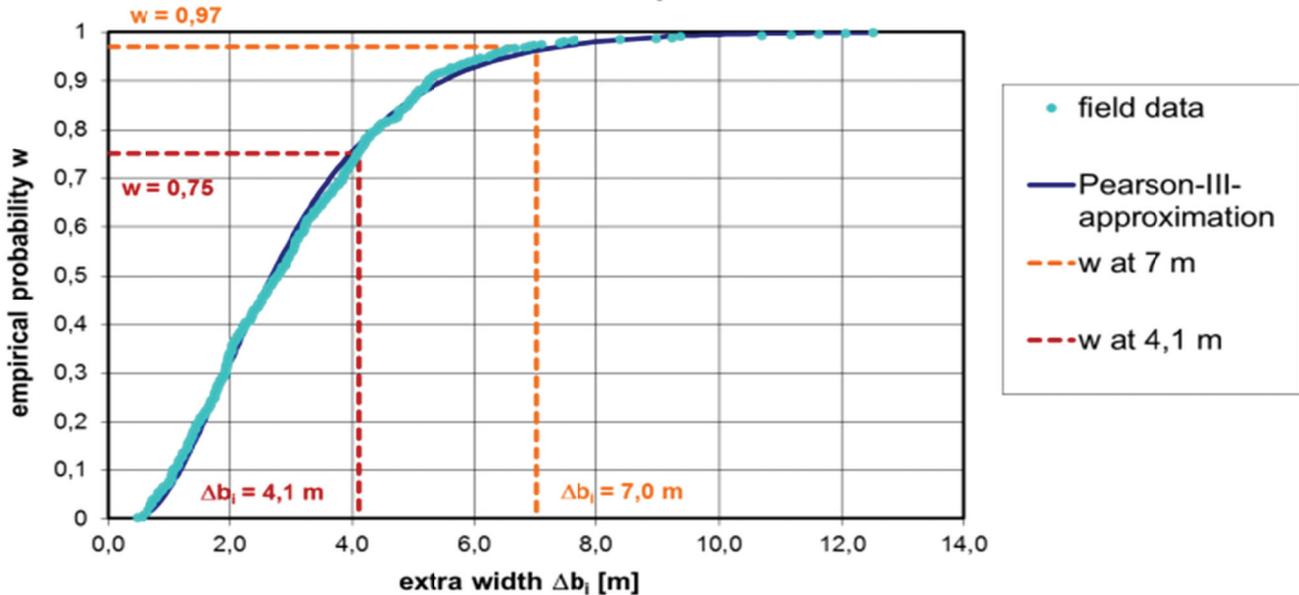


Abbildung 5: Wahrscheinlichkeitsverteilung der durch Instabilitäten und "Human-Factor" Effekte verursachten Zusatzbreiten, abgeleitet von beobachteten Schiffsfahrten auf Rhein und Neckar.

Leichtigkeits-kategorie	Bezeichnung	Angenommene Zusatzbreite $\Delta b_i$	Superpositionsmethode für $\Delta b_i$ bei mehr als einem Schiff im Querschnitt	Entsprechende Annahmen zur Ableitung von Sicherheitsabständen mit und ohne Bugrudernutzung
A	Nahezu uneingeschränkt leichte Fahrt	ca. 7 m	Arithmetisch (Annahme, dass die Schiffsführer unabhängig voneinander agieren)	Manöver ohne jegliche Kooperation, keine Nutzung von Bugrudernanlagen notwendig
B	Moderat bis stark eingeschränkt leichte Fahrt	ca. 4 m	Statistisch (wie Standardabweichungen; Annahme, dass zwei große $\Delta b_i$ gleichzeitig auftreten, gering ist)	Notwendigkeit zur Kooperation, aber generell keine Nutzung von Bugrudernanlagen notwendig
C	Stark eingeschränkt leichte Fahrt auf kurzen Strecken	ca. 2 m	Statistisch	Notwendigkeit zur Kooperation und zur Nutzung aller effizienten Rudernanlagen

Tabelle 1: Leichtigkeitskategorien nach PIANC INCOM WG 141 und mögliche Zuordnung von Zusatzbreiten durch Instabilitäten und ihre Superposition im Fall, dass sich mehr als ein Schiff im Querschnitt befindet (vorläufige Zahlen, entsprechend Abbildung 5), die zur Bewertung von Manövern in der Verkehrssimulation genutzt werden können (zusammen mit Annahmen zu Sicherheitsabständen und Bugstrahlrudernutzung).

Wenn wir diese Werte von  $\Delta b_i$  als einen ersten Ansatz zur Beschreibung von "Human-Factor" Effekten verwenden, wobei sie noch an die genannten Einflüsse wie Flusskrümmung und Fahrtrichtung angepasst werden müssen, können sie mit den Leichtigkeitskategorien verknüpft werden, wie sie in den zukünftigen Richtlinien von PIANC INCOM WG 141 (Deplaix & Söhngen 2013) definiert werden, zusammen mit der Methode ihrer Superposition im Fall von Begegnungen oder Überholmanövern. Der Ansatz basiert auf den Ergebnissen eines Vergleichs der berechneten benötigten Breite in geraden Kanälen mit denen in den deutschen und niederländischen Richtlinien für Richtungs- und Begegnungsverkehr und niedrige und hohe Verkehrsstärken. Dies ist in Tabelle 1 dargestellt, die in folgender Weise für die Verkehrssimulation genutzt werden kann:

- Da der Schiffsführer im Allgemeinen versucht, so unbeschränkt wie möglich zu fahren, kann in der Praxis angenommen werden, dass die genutzte Zusatzbreite in der ungestörten Fahrt die der höchsten Leichtigkeitskategorie "A" in Tabelle 1 entspricht (Spitzenwerte von  $\Delta b_i$ ). Allen Manövern, die während eines Laufs der Simulation auftreten, in denen die verfügbare Breite größer ist als die benötigte Breite (berechnet durch Verwendung von Spitzenwerten von  $\Delta b_i$ ), kann die Leichtigkeitskategorie "A" zugewiesen werden, die für den Rhein anzustreben ist. Auch die Entscheidung, ob ein Manöver von einem normal qualifizierten und aufmerksamen Schiffsführer vorgenommen wird oder nicht, kann auf Basis des Vergleiches der mit Spitzenwerten von  $\Delta b_i$  berechneten benötigten Breite

mit der zur Verfügung stehenden Breite des Fahrwassers erfolgen.

- Wenn während der Simulation eine Situation auftritt, z.B. da der gewählte Informationsradius des betrachteten Schiffes klein ist, in der die für den Leichtigkeitsstandard "A" benötigte berechnete Breite zu groß im Vergleich zur verfügbaren Breite ist, aber ausreichend im Fall eines  $\Delta b_i$  der Leichtigkeitskategorie "B" (hoch, aber keine Spitzenwerte von  $\Delta b_i$ ), kann die Manöversituation mit der Kennung "B" versehen werden. Die Situation erfordert eine größere Aufmerksamkeit zur Durchführung des Manövers, aber ist ohne die Nutzung eines Bugstrahlruders möglich.
- Wenn die benötigte Breite durch die Verwendung des kleinsten  $\Delta b_i$  in Tabelle 1 verringert werden muss, um eine Berührung der seitlichen Grenzen des Fahrwassers zu vermeiden, kann die Leichtigkeit dieser besonderen Verkehrssituation mit der niedrigsten Kategorie "C" bezeichnet werden. Die Fahrt ist möglich, aber benötigt hohes Fahrkönnen und Aufmerksamkeit sowie – wenn verfügbar und wirksam – den Einsatz eines Bugstrahlruders. In noch engeren Situationen kann davon ausgegangen werden, dass eine Havarie auftreten kann.

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise wird als erster Versuch zur Berücksichtigung von "Human-Factor" Effekten in der Verkehrssimulation verwendet, wobei die erwähnten Werte von  $\Delta b_i$  mit dem Forschungsschritt der BAW angepasst werden sollen. Außerdem ist eine Berücksichtigung von zufällig variierten  $\Delta b_i$  geplant.

## 2.2 Verhaltensmodell

Die longitudinale Verhaltenskomponente des Mikromodells für den Verkehr auf der Wasserstraße ist von einem weit verbreiteten Fahrzeugfolgmodell für den motorisierten Straßenverkehr abgeleitet. Fahrzeugfolgmodelle beschreiben die Reaktion des Fahrers in Form der Wunschbeschleunigung als Funktion des (Stoßstange-zu-Stoßstange) Abstands  $s$  zum vorausfahrenden Fahrzeug, der Geschwindigkeit  $v$ , und der Geschwindigkeit  $v_l$  des vorausfahrenden Fahrzeugs. Aufgrund seiner einfach zu interpretierenden Parameter und des glatten Beschleunigungsprofils wählen wir das Intelligent-Driver Model (IDM) von Treiber, M. et al. (2010) als Basismodell. Es wird durch die Beschleunigungsgleichung

$$\frac{dv(s, v, v_l)}{dt} = a_{\text{free}}(v) - a \cdot \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \quad (7)$$

beschrieben. Die freie Beschleunigungsfunktion

$$a_{\text{free}}(v) = a \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^4 \right] \quad (6)$$

modelliert eine Beschleunigung, die ihr Maximum bei Geschwindigkeit 0 hat und mit Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit  $v_0$  gleichmäßig gegen 0 geht. In den meisten Fällen wird diese Situation jedoch durch das Physik-Teilmodell aus Abschnitt 2.1 behandelt. Interessanter ist für unser Vorhaben die Wechselwirkungskomponente

$$a_{\text{int}}(s, v, v_l) = -a \cdot \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 =: -a \cdot z(s, v, v_l)^2, \quad (7)$$

welche die Absicht eines Fahrers oder Schiffsführers modelliert, dem vorausfahrenden Fahrzeug im gebundenen Verkehr mit einem dynamischen Abstand

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[ 0, vT + \frac{v - v_l}{2\sqrt{ab}} \right] \quad (8)$$

zu folgen. Dieser setzt sich aus dem Minimalabstand  $s_0$  für stehende Fahrzeuge, einer Zeitlücke  $T$  und einem dynamischen Beitrag, der die gleichmäßige Annäherung an ein langsames oder stehendes Fahrzeug mit einer komfortablen Verzögerung  $b$  ermöglicht, zusammen.

Es stellt sich heraus, dass eine leichte Abwandlung des IDM, das Improved IDM (IIDM) wie von Treiber, M. & Kesting, A. (2013) beschrieben, besser für den Verkehr auf Wasserstraßen geeignet ist. Ein Grund ist, dass das Entscheidungsmodell, wie später beschrieben, als Ergebnis eine kleinere Wunschgeschwindigkeit als die aktuelle Geschwindigkeit ergeben kann und das IDM in dieser Situation zu empfindlich reagiert. Das IIDM unterscheidet zwischen den Fällen  $z < 1$  (die aktuelle Lücke ist größer als die gewünschte Lücke) und  $z \geq 1$ . Seine Beschleunigungsfunktion lautet

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{v \leq v_0} = \begin{cases} a(1 - z^2) & z \geq 1 \\ a_{\text{free}}(1 - z^{2a/a_{\text{free}}}) & \text{sonst} \end{cases} \quad (9)$$

falls  $v \leq v_0$ . Wenn das Fahrzeug schneller als die Wunschgeschwindigkeit ist, ist die Beschleunigungsfunktion durch

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{v > v_0} = \begin{cases} a_{\text{free}} + a(1 - z^2) & z \geq 1 \\ a_{\text{free}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

gegeben. In beiden Fällen wird die erweiterte freie Beschleunigungsfunktion

$$a_{\text{free}}(v) = \begin{cases} a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^4 \right] & \text{wenn } v \leq v_0 \\ -b \left[ 1 - \left( \frac{v_0}{v} \right)^{4a/b} \right] & \text{wenn } v > v_0 \end{cases} \quad (11)$$

verwendet. Dieses Modell hat den gleichen Parametersatz wie das IDM, die Wunschgeschwindigkeit  $v_0$ , die Zeitlücke  $T$ , den Minimalabstand  $s_0$ , die Maximalbeschleunigung  $a$ , und die komfortable Verzögerung  $b$ .

Durch Anpassung dieser Parameter können verschiedene Fahrstile modelliert werden. Typische Parameter für Binnenschiffe sind in Abschnitt 3.1 gegeben.

## 2.3 Kombination des Physik-Modells und des Verhaltensmodells

Wir verwenden eine Kombination des Improved Intelligent Driver Model wie in Abschnitt 2.2 beschrieben und des Physik-Teilmodells aus Abschnitt 2.1, um physikalische und Verhaltenskomponenten zu verknüpfen. Die physikalische Beschleunigung  $a_{\text{max/min}}^{\text{phys}}$  bei maximaler und minimaler Maschinenleistung begrenzt die vom IIDM gegebene Beschleunigung  $a_{\text{IIDM}}$ :

$$a_{\text{Vessel}} = \max\left(a_{\text{min}}^{\text{phys}}, \min\left(a_{\text{max}}^{\text{phys}}, a_{\text{IIDM}}\right)\right). \quad (12)$$

Das Physik-Teilmodell kann durch Variation der Maschinenleistung beeinflusst werden, dass IIDM durch Variation der Wunschgeschwindigkeit.

Im freien Verkehr wird die Dynamik durch das Physik-Teilmodell beschrieben. Der Schiffsführer stellt die gewünschte Maschinenleistung ein und die Beschleunigung ist durch das Physikmodell gegeben. Infolgedessen ist die Geschwindigkeit auf die physikalisch höchstmögliche Geschwindigkeit begrenzt. Im IIDM ist die Wunschgeschwindigkeit auf unendlich gesetzt, daher verringert sich die vom IIDM gegebene Beschleunigung nicht mit wachsender Geschwindigkeit. Jedoch wird sie durch das Physikmodell beschränkt, wenn die physikalisch höchstmögliche Geschwindigkeit erreicht ist. Nähert sich das Schiff einem vorausfahrenden Schiff, übernimmt das IIDM und reduziert die Beschleunigung, um den Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug einzuhalten. Durch die Nutzung dieser Kombination von Physikmodell und IIDM werden freier und gebundener Verkehr komplett beschrieben. Während Begegnungen und Überholmanövern reduziert der Steuermann aktiv die Wunschgeschwindigkeit, um Konflikte zu lösen. Zur Einleitung eines Überholmanövers wird die Beschleunigung in Bezug auf das nächste vorausfahrende Fahrzeug anstelle des aktuell vorausfahrenden Fahrzeugs berechnet. Diese zwei Verkehrssituationen werden in den nächsten Abschnitten im Detail beschrieben.

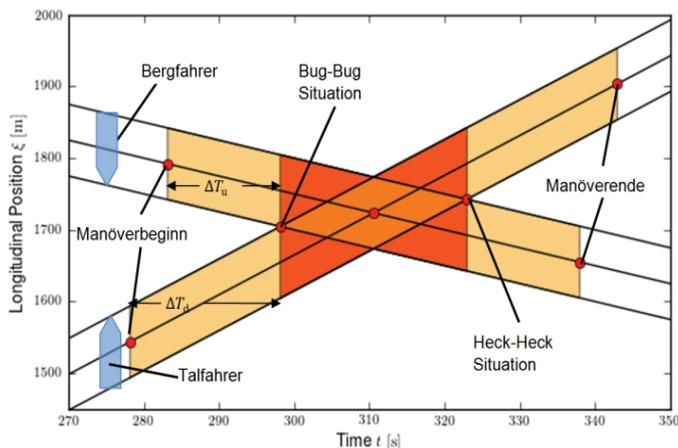
## 2.4 Entscheidungskomponenten

### 2.4.1 Begegnungen

Wir nehmen an, dass der Bergfahrer die Begegnung durch Anpassung seiner Geschwindigkeit regeln muss. Wenn er die Begegnung nicht regeln kann, wird der Talfahrer ersucht, seine Geschwindigkeit auf die kleinstmögliche Geschwindigkeit zu reduzieren. Diese Situation tritt nur auf, wenn der Bergfahrer sich bereits in der Engstelle befindet und diese nicht verlassen kann, bevor der Talfahrer ihn erreicht. Die Engstellen werden durch den Vergleich von benötigter und vorhandener Fläche bestimmt (vgl. Abschnitt 2.1). Sie hängen von der Geschwindigkeit beider Schiffe ab. Um zu beurteilen, ob ein Konflikt gelöst werden kann, werden die Engstellen für diskrete Geschwindigkeitswerte der beteiligten Schiffe in jedem gegebenen Querschnitt bestimmt. Wir nehmen eine zeitlich konstante Geschwindigkeit beider Schiffe, Berg- und Talfahrer, an, um den Bereich zu bestimmen in dem die Begegnung stattfindet. Da wir die laterale Dynamik nicht modellieren, nehmen wir eine konstante Zeit für den "Spurwechsel" an, so dass der Bereich mit der Geschwindigkeit wächst. Beide Schiffe müssen auch während des Spurwechsels in den Querschnitt passen. Eine Veranschaulichung der raumzeitlichen Belegungsfläche ist in Abb. 6 dargestellt. Der Bergfahrer passt seine Geschwindigkeit an die größt-mögliche Geschwindigkeit an, mit der der Konflikt gelöst wird. Wenn der Bergfahrer den Punkt an dem der Spurwechsel beginnt bereits passiert hat, darf er seine Geschwindigkeit nur noch halten oder verringern. Der Schiffsführer setzt diese Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit im IIDM, die Beschleunigung wird nun in Bezug auf diese

Wunschgeschwindigkeit berechnet. Diese Entscheidung wird in jedem Zeitschritt überprüft und korrigiert.

Wenn mehr als ein Talfahrer entgegenkommt, muss der Bergfahrer alle Begegnungen auf einmal regeln, wenn die Begegnungsflächen räumlich überlappen wie in Abb. 7 gezeigt. Die Talfahrer werden zu einem virtuellen Schiff zusammengefasst, der Bergfahrer muss seine Geschwindigkeit anpassen.



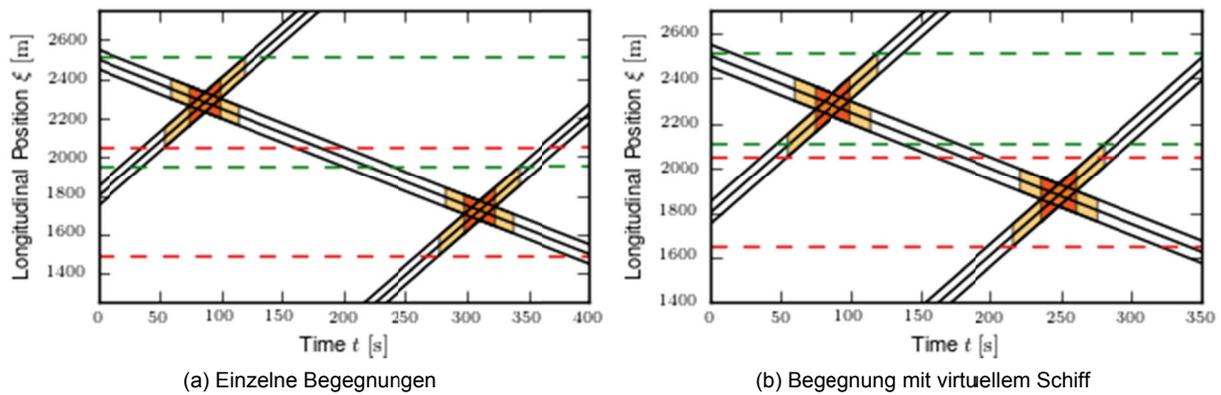
**Abbildung 6:** Raumzeitliche Belegungsflächen zur Veranschaulichung der Begegnungsstrategie. Wichtige Manöverpunkte sind gekennzeichnet. Das Manöver startet zurzeit  $[\Delta T]_{u/d}$  vor der Bug-Bug Situation und endet die gleiche Zeitspanne nach der Heck-Heck Situation.

Der Bergfahrer passt seine Wunschgeschwindigkeit nur während der Manövervorbereitung an. Die Vorbereitung einer Begegnung ist beendet, sobald die Schiffe Bug an Bug liegen. Sobald das Manöver vorbereitet ist, wird es mit der aktuellen Wunschgeschwindigkeit durchgeführt. Der Erfolg des Manövers wird überwacht. Der Bergfahrer darf die Begegnung mit einem weiteren entgegenkommenden Schiff vorbereiten. Zu diesem Zeitpunkt wird der Talfahrer aus dem virtuellen Schiff entfernt, folgende Talfahrer bleiben darin. Die Geschwindigkeit des Talfahrers wird durch die physikalischen Grenzen begrenzt und, falls er einem anderen Schiff folgt, durch die Geschwindigkeit und den Abstand zu diesem Schiff. Wenn der Talfahrer mit minimaler Geschwindigkeit fahren musste, beschleunigt er erst nach Manöverende wieder.

### 2.4.2 Überholmanöver

Wenn ein Schiff einem vorausfahrenden Schiff folgt, kann der Schiffsführer entscheiden, dieses zu überholen. Dazu müssen zwei Kriterien erfüllt sein: Das Anreiz- und das Sicherheitskriterium.

Das Anreizkriterium ist in Form der Beschleunigung formuliert. Anstelle des aktuellen vorausfahrenden Schiffes, wird die Beschleunigung in Bezug auf das nächste vorausfahrende Schiff berechnet und mit der aktuell möglichen Beschleunigung verglichen. Wenn die neue Beschleunigung größer ist, ist der Anreiz zu überholen gegeben. Jedoch muss zunächst das Sicherheitskriterium betrachtet werden, bevor das Überholmanöver durchgeführt werden kann.



**Abbildung 7:** Raumzeitliche Belegungsflächen zur Veranschaulichung der Begegnungsstrategie im Fall von zwei (oder mehr) Talfahrern. Grün gestrichelte Linien beschreiben die obere und rot gestrichelte Linien die untere Grenze eines Begegnungsbereichs. Im Fall (a) überlappen die Bereiche der beiden Begegnungen nicht, sie werden einzeln vorbereitet, während die Bereiche im Fall (b) überlappen und die Schiffe zu einem virtuellen Schiff zusammengefasst und zeitgleich behandelt werden müssen.

Das Sicherheitskriterium ist der Berechnung der Engstellen während einer Begegnung ähnlich. Der für das Überholmanöver benötigte Bereich wird unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit aller beteiligten Schiffe berechnet. Wie zuvor wird angenommen, dass Spurwechsel eine konstante Zeit benötigen. Ein Bergfahrer muss nicht auf ein entgegenkommendes Schiff reagieren, das gerade überholt. Es liegt in der Verantwortung des Überholers sicherzustellen, dass der benötigte Platz vorhanden ist. Wenn dies nicht der Fall ist, wird das Überholmanöver abgebrochen und der Bergfahrer muss die Begegnung regeln.

### 3. Simulation

In diesem Abschnitt nutzen wir das beschriebene Modell, um den Verkehr auf Fließgewässern in einem einfachen Szenario mit Begegnungsverkehr und einer einzelnen Engstelle zu simulieren.

#### 3.1 Aufbau der Simulation

Zwei verschiedene Schiffstypen, groß (Typ 1) und klein (Typ 2), befahren das Fahrwasser eines Flusses mit einer Engstelle in der Mitte. Die Parameter der Schiffe sind in Tabelle 2 gegeben.

	Schiffstyp 1	Schiffstyp 2
<b>Länge</b>	110 m	85 m
<b>Breite</b>	11.45 m	9.5 m
<b>Masse</b>	3174 t	1817 t
<b>Mittlerer Tiefgang</b>	2.8 m	2.5 m
<b>Maximaler Tiefgang</b>	2.8 m	2.5 m
<b>Wunschleistung (zu Berg)</b>	1100 kW	900 kW
<b>Wunschleistung (zu Tal)</b>	330 kW	270 kW
<b>Manöverzeit</b>	20 s	20 s

**Tabelle 2:** Schiffsparameter

Die IIDM Parameter werden für beide Schiffstypen als identisch angenommen und sind in Tabelle 3 gegeben.

Die Parameter  $a$  und  $b$  sind so gewählt, dass sie typische Beschleunigungen des Physikmodells darstellen. Wir betrachten einen Flussabschnitt mit einer mittleren Tiefe von 4.5 m innerhalb der Fahrrinne, einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 2 m/s und mit einer 500 m langen Engstelle zwischen Flusskilometer 8 und 8.5. Die Engstelle zeichnet sich durch ein lokal verkleinertes Querprofil, verbunden mit einer erhöhten Fließgeschwindigkeit von 2.1 m/s, aus. Zwei große Schiffe (Typ 1) können die Engstelle nicht gleichzeitig befahren, jede andere Kombination von Schiffen ist jedoch möglich. Die Quellen und Senken für die Schiffe befinden sich bei Flusskilometer 3 und 13. Nur die Bergfahrer müssen die Begegnungen regeln und ihre Geschwindigkeit anpassen, d.h. nur sie sind von der Engstelle betroffen. Überholmanöver werden nicht betrachtet.

<b>Zeitlücke <math>T</math></b>	90 s
<b>Minimaler Abstand <math>s_0</math></b>	100.0 m
<b>Wunschgeschwindigkeit <math>v_0</math></b>	$\infty \frac{m}{s}$
<b>Maximale Beschleunigung <math>a</math></b>	$0.05 \frac{m}{s^2}$
<b>Komfortable Verzögerung <math>b</math></b>	$0.02 \frac{m}{s^2}$

**Tabelle 3:** Typische IIDM Parameter für Binnenschiffe

Wir führen eine Reihe von Simulationen mit verschiedener Verkehrsnachfrage und Flottenstruktur in Berg- und Talfahrt durch. Die Engstellenkapazität definieren wir als den maximalen Schiffsfluss (Zahl der Schiffe die pro Zeiteinheit einen bestimmten Querschnitt vor der Engstelle passieren) den die Engstelle ohne Stauung erträgt und untersuchen, wie diese Kapazität von den zuvor genannten Einflussfaktoren abhängt. Um einen Stau der Bergfahrer zu detektieren wird als Kriterium verwendet, dass mindestens 5 dieser Schiffe langsamer sind als 40% der an der jeweiligen Position physikalisch höchstmögliche Geschwindigkeit bei freier Fahrt. Die Verkehrsnachfrage wird für die Talfahrer von 0 Fz/h bis 15 Fz/h variiert, die Nachfrage der Bergfahrer von 0 Fz/h bis 20 Fz/h. Jedoch wird ein Schiff dem Verkehr nur dann hinzugefügt, wenn genug Platz auf dem Fluss

ist, daher kann der reale Verkehrsfluss geringer als die eingestellte Nachfrage sein. Um den realen Verkehrsfluss als Funktion der lokalen Verkehrsdichte zu berechnen, werden Fluss-Dichte-Daten aggregiert, indem die Zahl der Schiffe und deren Geschwindigkeit in den Abschnitten von Flusskilometer 9 bis 10 und 10 bis 11 über Zeiträume von 30 Minuten gezählt und gemittelt wird.

Ergänzend zu den Fluss-Dichte-Daten, berechnen wir theoretische "Fundamentaldiagramme", die per Definition das Fließgleichgewicht von identischen Schiffen als eine Funktion der Dichte geben (Treiber, M. & Kesting, A. (2013)). Im Allgemeinen bestehen Fluss-Dichte-Daten und Fundamentaldiagramme aus zwei Regionen, dem freien Verkehr, gekennzeichnet durch kleine Dichten und mit der Dichte wachsendem Fluss und dem gebundenen Verkehr, gekennzeichnet durch einen mit der Dichte sinkenden Fluss. Die Steigung des freien Zweiges ist durch die freie Wunschgeschwindigkeit gegeben, welche die physikalisch größtmögliche Geschwindigkeit bei gegebener Wunschleistung ist. Das Fundamentaldiagramm wird an einer Stelle außerhalb der Engstelle für beide Schiffstypen und Richtungen berechnet.

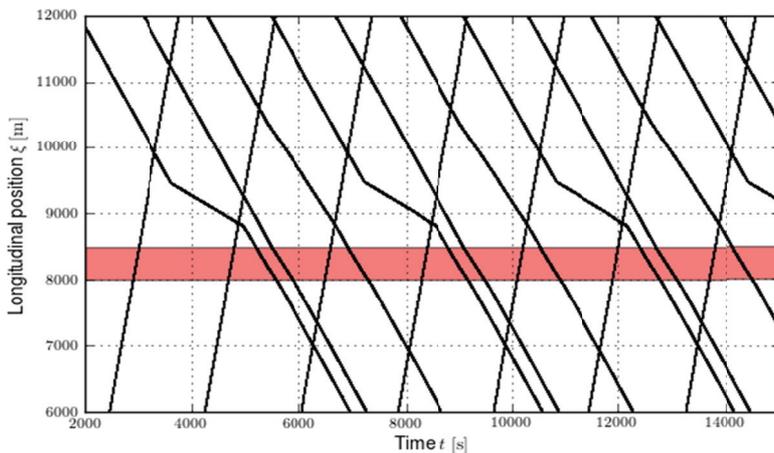


Abbildung 8: Typische Trajektorien von Schiffen, die sich in Gegenwart einer Engstelle (rot) begegnen. Die Bergfahrer müssen abbremsen um entgegenkommende Schiffe durchzulassen.

### 3.2 Ergebnisse der Simulation

Ein typisches Beispiel von Schiffstrajektorien ist in Abb. 8 gegeben. Der Fluss der Talfahrer ist so groß, dass einige Bergfahrer die Engstelle nicht direkt passieren können und davor die Geschwindigkeit reduzieren oder abstoppen müssen. Jedoch enthält diese Simulation noch nicht das Staukriterium, da zu gegebener Zeit höchstens ein Schiff langsamer fahren muss.

Die berechneten Fundamentaldiagramme sind in Abb. 9 (a-d) dargestellt. Wir erkennen die maximalen Flüsse an den Spitzen der Dreiecke und die Wunschgeschwindigkeiten an der Steigung der freien Zweige. Die Werte sind in Tabelle 4 gegeben.

	Typ 1 Zu Berg	Typ 1 Zu Tal	Typ 2 Zu Berg	Typ 2 Zu Tal
$Q_{\max} \left[ \frac{\text{Fz}}{\text{h}} \right]$	15.4	26.2	19.3	27.8
$v_{\text{desired}} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	1.47	4.58	1.94	4.87

Tabelle 4: Maximale Flüsse und Wunschgeschwindigkeiten für die verschiedenen Schiffstypen in beiden Fahrrichtungen, wie in den Fundamentaldiagrammen dargestellt.

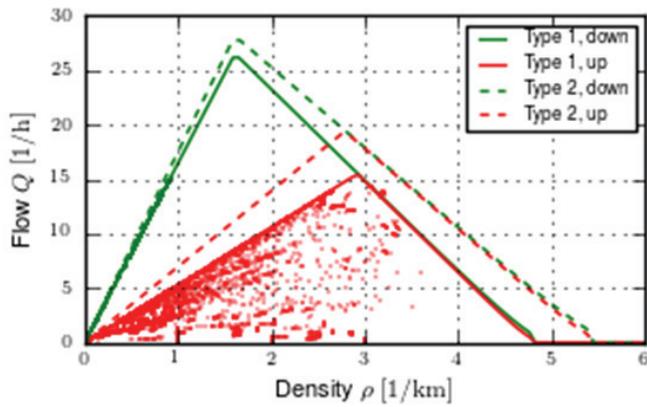
Die maximalen Dichten sind für beide Richtungen gleich, hängen aber vom Schiffstyp ab. Wir ermitteln  $\rho_1^{\max} = 4.8 \text{ Fz/km}$  und  $\rho_2^{\max} = 5.4 \text{ Fz/km}$ .

Die Fluss-Dichte-Datenpunkte für verschiedene Verkehrszusammensetzungen sind in den gleichen Abbildungen wie die Fundamentaldiagramme gegeben. Im Fall der Talfahrer streuen die Punkte um den freien Zweig der Fundamentaldiagramme. Wenn der Verkehr aus beiden Schiffstypen besteht, sind die beiden freien Zweige und die Fläche dazwischen belegt. Je größer der Fluss der langsameren Schiffe vom Typ 1, desto mehr Punkte liegen bei großen Dichten auf dem freien Zweig des Fundamentaldiagramms vom Typ 1. Viele der Fluss-Dichte-Datenpunkte liegen innerhalb des Dreiecks, das durch die beiden Zweige und die  $\rho$ -Achse gebildet wird. Einige Datenpunkte streuen um die gebundenen Zweige. Mit wachsendem Anteil der Schiffe vom Typ 2, reichen die Fluss-Dichte-Daten des freien Verkehrs auch zu höheren Dichten, bis sie den gebundenen Zweig der Schiffe vom Typ 2 erreichen.

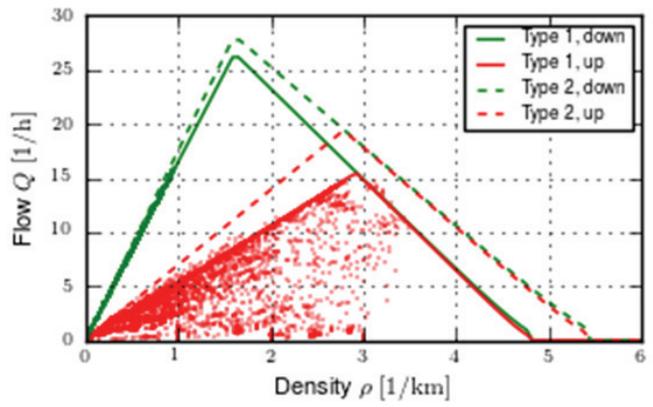
Obwohl die maximale Verkehrsnachfrage der Bergfahrer bei 20 Fz/h liegt, ist der reale Fluss kleiner, wie an den Fluss-Dichte-Daten zu sehen ist. Wenn der Verkehr nur aus Schiffen vom Typ 1 besteht, liegt der größte gemessene Fluss bei 14.25 Fz/h. Er vergrößert sich mit dem Anteil der Schiffe vom Typ 2 geringfügig.

In Abb. 10 (a-d) ist der Verkehrszustand für Kombinationen von unterschiedlichen Verkehrsnachfragen in Berg- und Talfahrt und verschiedene Verkehrszusammensetzungen gezeigt. Grüne Punkte entsprechen freiem, rote Punkte gestautem Verkehr. Nur Verkehrsnachfragen, die auch realisiert und in den Fluss-Dichte-Daten beobachtet wurden, sind in den Abbildungen berücksichtigt.

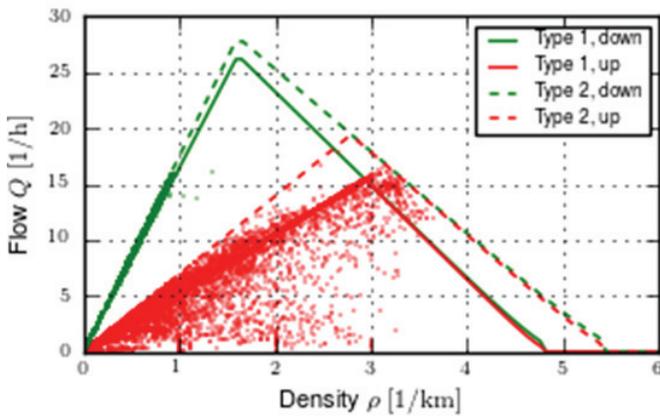
Wie in der Abbildung zu sehen ist, hängt die zuvor definierte Engstellenkapazität stark vom Fluss der Talfahrer ab. Je mehr Schiffe vom Typ 2 in der Verkehrszusammensetzung enthalten sind, desto stärker streut die Grenze zwischen gestautem und freiem Verkehr. Im Fall von 10% oder weniger von Schiffen des Typs 1 kann anhand der Abbildungen keine Engstellenkapazität definiert werden, zufällig verteilte Fluss-Kombinationen über  $Q_{\text{up}} = 6 \text{ Fz/h}$  und  $Q_{\text{down}} = 2.5 \text{ Fz/h}$  ergeben einen Stau.



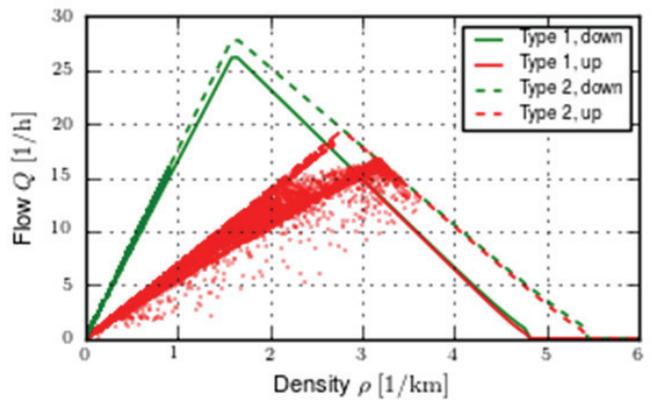
(a) Schiffstyp-Verhältnis 1:0



(b) Schiffstyp-Verhältnis 0.9:0.1



(c) Schiffstyp-Verhältnis 0.5:0.5



(d) Schiffstyp-Verhältnis 0.1:0.9

**Abbildung 9:** Fluss-Dichte-Daten (Symbole) und theoretische Fundamentaldiagramme (Linien) für beide Schiffstypen in Berg- (rot) und Talfahrt (grün) und für verschiedene Verkehrszusammensetzungen A:B der zwei Schiffstypen 1 (A) und 2 (B). Es gibt keinen gestauten Verkehr in der Talfahrt, daher keine Fluss-Dichte-Daten des gebundenen Verkehrs.

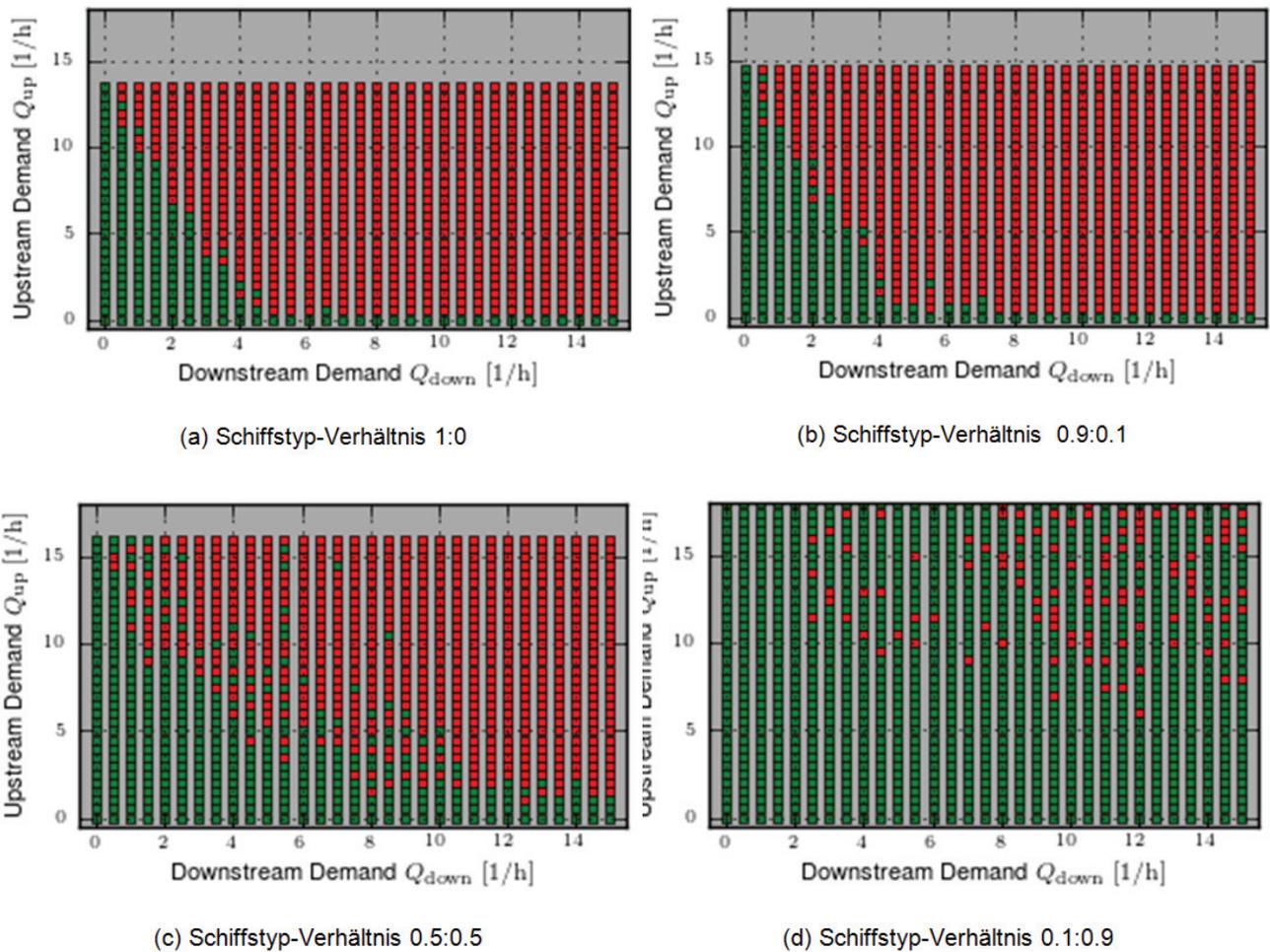


Abbildung 10: Phasendiagramme des freien und gestauten Verkehrszustands als Funktion der Verkehrsnachfrage in Berg- und Talfahrt (Fahrzeuge pro Stunde) und für verschiedene Verkehrszusammensetzungen A:B der zwei Schiffstypen 1 (A) und 2 (B).

### 3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Fundamentaldiagramme zeigen die erwartete dreieckige Form. Sie unterscheiden sich, wie erwartet, für die verschiedenen Schiffstypen und Fahrrichtungen. Auf dem freien Zweig wird die Dynamik vom Physik-Modell bestimmt, während das IIDM auf dem gebundenen Zweig überwiegt. Dies erklärt die ähnliche Form der gebundenen Zweige für beide Fahrrichtungen eines Schiffstyps. Die freie oder physikalisch mögliche Geschwindigkeit, gegeben durch die Steigung des freien Zweigs, ist für Talfahrer größer als für Bergfahrer. Die maximale Dichte entspricht den erwarteten maximalen Dichten  $\rho_{max}^i = 1/(s_0 + l_i)$  mit der Länge  $l_i$  des Schiffstyps  $i$ .

Die gemessenen Fluss-Dichte-Daten der Talfahrer streuen um den freien Zweig. Dies zeigt, dass diese Schiffe nicht durch die Engstelle beeinflusst werden. Nur Bergfahrer müssen Begegnungskonflikte lösen, so dass gebundene Verkehrszustände auftreten. Die Bergfahrer können alle Begegnungskonflikte lösen, die Talfahrer müssen nicht langsamer werden, da alle Fluss-Dichte-Daten auf dem freien Zweig liegen. Es treten demnach keine kritischen Situationen auf.

Die Schiffe vom Typ 2 werden durch die Schiffe vom Typ 1 ausgebremst, wie an den Fluss-Dichte-Daten in

Abb. 9 (c) und (d) gesehen werden kann. Obwohl die Zahl der Schiffe vom Typ 2 groß ist, liegen die Datenpunkte auf dem freien Zweig der Schiffe vom Typ 1. Dies zeigt die langsamere Geschwindigkeit. Wir erwarten, dass dieser Effekt durch die Erlaubnis von Überholmanövern reduziert werden würde.

Datenpunkte innerhalb des Fundamentaldiagramms stellen gemischte Zustände von freiem und gebundenem Verkehr dar. Ursache sind die Aggregation der Daten und dynamische Effekte.

Als ein Hauptergebnis beobachten wir, dass die Engstellenkapazität stark vom Fluss der Talfahrer und der Verkehrszusammensetzung abhängt. Während bei reinem Bergfahrerverkehr die theoretische Kapazität über 15 Fz/h liegt, fällt sie bei einem talfahrenden Fluss von gerade einmal 1 Fz/h und einem Verkehr der nur aus Schiffen vom Typ 1 besteht auf 10 Fz/h ab. Ein Fluss von  $Q_{down} \approx 5$  Fz/h ist groß genug, um die Engstelle für Bergfahrer komplett zu blockieren. Je mehr Schiffe vom Typ 2 die Verkehrszusammensetzung beinhaltet, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer Lücke die groß genug ist, dass ein Bergfahrer die Engstelle passieren kann. Das Ergebnis ist eine größere Engstellenkapazität und die beobachtete unscharfe Grenze zwischen freiem und gestautem Verkehr.

### 4. Fazit

In unserem Beitrag haben wir gezeigt, wie eine mikroskopische, vieldynamische Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen durch die Kombination von Modellen verschiedener Forschungsrichtungen entworfen und implementiert werden kann. Ein neues Entscheidungsmodell zur Bewältigung von Begegnungen und Überholmanövern wurde eingeführt und "Human-Factor" Effekte wurden betrachtet. Da das Modell modular formuliert wurde, ist es möglich andere Physik-Modelle oder Verfahren zur Berechnung der Zusatzbreiten zu verwenden und es so an andere Schiffstypen anzupassen.

Durch unseren mikroskopischen Ansatz ist das Modell imstande, heterogenen Verkehr mit verschiedenen Arten von Schiffen und Charakteren von Schiffsführern zu simulieren. Es kann untersucht werden, wie Änderungen an der Fluss-Infrastruktur wie Fahrrinntiefen und -breiten, Änderungen am Pegel, verschiedene Flottenstrukturen oder sogar neue Schiffstypen den Verkehrsfluss beeinflussen.

Durch die Verwendung eines semi-empirischen Ansatzes zur Berechnung der Zusatzbreiten sind wir in der Lage, verschiedene Lösungen von Konflikten in Verkehrssituationen zu modellieren. Es ist sogar möglich, "Human-Factor" Effekte zu berücksichtigen und die Schwierigkeit eines Manövers im Rahmen einer Leichtigkeitskategorie zu bewerten.

Abschließend haben wir einen simulierten Nachweis der Arbeitsweise des Modells gegeben und gezeigt, welche Art von Daten berechnet werden kann. Als ein letztes Ergebnis haben wir herausgefunden, dass die Kapazität einer Engstelle sehr dynamisch ist und stark von der Flottenstruktur und dem Anteil der Talfahrer abhängt.

Um die Entscheidungsmodelle zu validieren und die Modellparameter zu kalibrieren, werden reale Daten der Trajektorien von Begegnungen und Überholmanövern benötigt. Ergänzend ist weitere Forschung nötig, um statistische Daten zu Schiffstypen, Verkehrszusammensetzung und Ankunftsverteilungen zu erhalten.

### Literatur

BMVBS, (2011). Guidelines on standard cross sections of inland navigation channels, Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development, Germany, 2011

Dai, M.D.M. & Schonfeld, P. (1991). Simulation of Waterway Transportation Reliability. Transportation Research Record 1313 (98)

Deplaix, J.-M., Söhngen, B. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Safety and Ease Standards (PIANC-INCOM WG 141). Smart Rivers Conference 2013

Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. Rev. Mod. Phys. 73 (1067)

Rettemeier K. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Review of Existing Guidelines (PIANC-INCOM WG 141). Smart Rivers Conference 2013

Söhngen B., Maedel N., Hahne L., Verdugo I., Iribarren J. (2012). Additional navigational widths of inland vessels passing cross current fields. PIANC ON COURSE, January 2012

Söhngen B., Rettemeier K. (2013). Design Guidelines for Inland Waterways. (PIANC INCOM WG 141)

Söhngen, B., Rettemeier, K. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Concept Design Method (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

Söhngen, B., Paprocki, M., KLIWAS-TP 4.4/2013, Schlussbericht, Mindestbreiten der Fahrrinnen für eine sichere und leichte Schifffahrt. BMVI, Koblenz 2013

Söhngen, B., Paprocki, M., Feierfeil T., Orlovius A., Leismann K. (2014). „Abladeoptimierung Mittelrhein, Schlussbericht zum Fahrrinnenbreitenbedarf“. BAW, to appear

Thiers, G. F. & Janssens, G. K. (1998). A Port Simulation Model as a Permanent Decision Instrument. SIMULATION 71 (117)

Treiber, M., Hennecke, A. & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Phys. Rev. E 62 (1805)

Treiber, M. & Kesting, A. (2013). Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation. Springer. ISBN 978-3-642-32459-8.

UFC (2005). Unified Facilities Criteria, Design: Mooring, UFC 4-159-03. US Army Corps of Engineers. 3 October 2005

VBW (2013). Fahrdynamik von Binnenschiffen, Fahrverhalten auf Binnenwasserstraßen. Fachausschuss Binnenwasserstraßen und Häfen (VBW/HTG) und Fachausschuss für Binnenschiffe (VBW/STG). Germany, 2013

Wassermann, S., Söhngen, B., Dettmann T., Heinzemann C. (2010). Investigations to define minimum fairway widths for inland navigation channels. PIANC World Congress Liverpool, UK, 2010

Yee-Chung, Jin (1990). A study of flow in curved open channels. University of Alberta. Dep. Of Civil Engineering. 1990

### Verfasser

#### **Dipl.-Phys. Nicolas Fischer**

Technische Universität Dresden  
Institut für Wirtschaft und Verkehr  
Würzburger Str. 35  
01187 Dresden  
Tel.: 0351/463-36726  
E-Mail: [Nicolas.Fischer@tu-dresden.de](mailto:Nicolas.Fischer@tu-dresden.de)

#### **Dr. Martin Treiber**

Technische Universität Dresden  
Institut für Wirtschaft und Verkehr  
Würzburger Str. 35  
01187 Dresden  
Tel.: 0351/463-36794  
E-Mail: [Martin.Treiber@vwi.tu-dresden.de](mailto:Martin.Treiber@vwi.tu-dresden.de)

#### **Dr.-Ing. Bernhard Söhngen**

Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721/9726-4600  
E-Mail: [Bernhard.Soehngen@baw.de](mailto:Bernhard.Soehngen@baw.de)