

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Söhngen, Bernhard; Dettmann, Thorsten; Neuner, Hans
Modelluntersuchungen zur Ermittlung der erforderlichen horizontalen Sicherheitsabstände von Binnenschiffen zu Uferböschungen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102612>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Söhngen, Bernhard; Dettmann, Thorsten; Neuner, Hans (2007): Modelluntersuchungen zur Ermittlung der erforderlichen horizontalen Sicherheitsabstände von Binnenschiffen zu Uferböschungen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 90. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 137-150.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Modelluntersuchungen zur Ermittlung der erforderlichen horizontalen Sicherheitsabstände von Binnenschiffen zu Uferböschungen

PROF. DR.-ING. BERNHARD SÖHNGEN, DIPL.-ING. THORSTEN DETTMANN, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, KARLSRUHE, DIPL.-ING. HANS NEUNER, VERSUCHSANSTALT OBERNACH DER TU MÜNCHEN

1 Einführung

Fahrrinnenquerschnitte müssen gemäß Gesetzesauftrag eine leichte und sichere Fahrt mit Wasserfahrzeugen ermöglichen. Der Spielraum, der durch diese eher pragmatische Formulierung des Gesetzgebers dem planenden Ingenieur an die Hand gegeben wird, hat einen großen Einfluss auf die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung einer Wasserstraße durch die gewerbliche Schifffahrt. Dies liegt unter anderem daran, weil die Festlegung von Mindestquerschnitten der Fahrrinne unmittelbar die Ausbau- und Unterhaltungskosten beeinflusst und weil die aus Sicherheitsgründen legitime Forderung nach einer möglichst großen Fahrrinnenbreite in frei fließenden Gewässern die mögliche Fahrrinntiefe beschränkt und damit den volkswirtschaftlichen Nutzen einer Wasserstraße, der vor allem von der möglichen Fahrrinnen- und damit Abladetiefe abhängt. Schwierig ist die Aufgabe nicht nur wegen des schon angesprochenen Zielkonfliktes: Breite (Aspekt Sicherheit) gegen Tiefe (Aspekt Wirtschaftlichkeit), sondern auch deshalb, weil allgemeingültige Bemessungsstandards fehlen. Dies zeigt u. a. die große Varianz vorhandener Fahrrinnenbreiten, die sich in Flüssen vor allem an dem hydraulisch und flussmorphologisch Machbaren orientieren, wie dies eindrucksvoll am Beispiel des fahrdynamischen Engpasses am Jungferngrund (Rhein) deutlich wird, siehe Bild 1, und weniger an den fahrdynamischen Erfordernissen des Schiffsverkehrs, wie es im Idealfall aus der Sicht des Verkehrswasserbauers sein sollte. Fahrrinnenbreiten sind zudem nach ihrer Festlegung meist nur noch wenig angepasst worden, wie am Oberrhein, als man sie u. a. für die Flößerei bemaß.



Bild 1: Rhein mit Felsengruppe des Tauberwerth (links) und der Kiesbank des Jungferngrundes (rechts), einem der Unfallschwerpunkte der Gebirgsstrecke

Vor dem Hintergrund zunehmenden Verkehrs auf deutschen Binnenwasserstraßen und deren stärkerer Ausnutzung durch immer größere Fahrzeuge stellt sich deshalb vermehrt die Frage nach erforderlichen Mindestwerten der Fahrrinnenquerschnitte, wovon die horizontalen Sicherheitsabstände zu Uferböschungen eine wichtige Komponente sind. Sie wurden im vorliegenden Beitrag anhand von Modelluntersuchungen ermittelt, die an der Versuchsanstalt Obernach der Technischen Universität (TU) München (VAO) zunächst im Kontext der Variantenanalyse zum Donauausbau Straubing-Vilshofen im Auftrag von Bund und Bayern und schließlich im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamts (WSA) Bingen und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Böschung) durchgeführt wurden.

Hierzu wird im Folgenden zunächst der Begriff „Sicherheitsabstände“ präzisiert (Kapitel 2), um eine gemeinsame Verständnisbasis zu schaffen. Anschließend wird der Einfluss des Schiffsführers, insbesondere dessen Können und Aufmerksamkeit, nachfolgend kurz „human factor“ genannt, in Modell und Natur betrachtet, der die Ergebnisse ganz erheblich beeinflussen kann (Kapitel 3). Darauf aufbauend werden bestehende Standards und einschlägige veröffentlichte Bemessungsansätze betrachtet, um die Größenordnung der zu erwartenden Ergebnisse und deren Variationsbreite einzugrenzen (Kapitel 4 und 5). Anschließend werden die Ziele der Untersuchungen präzisiert (Kapitel 6) und es wird im Detail auf die Durchführung der Modellversuche eingegangen (Kapitel 7). Schließlich werden die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der Sicherheitsabstände in geraden Flussabschnitten zu einer Uferböschung (Kapitel 8) ausgewertet. Daraus wird ein erster Bemessungsansatz erarbeitet, auf häufig vorkommende Bemessungsfälle angewendet und im Hinblick auf die Übertragung auf abweichende Randbedingungen und den Forschungsbedarf bewertet (Kapitel 9).

2 Definition der Sicherheitsabstände

Die erforderliche Fahrrinnenbreite b_F einer Wasserstraße setzt sich formal aus der Summe der Fahrspurbreiten b_{FS} und der Sicherheitsabstände s zusammen. Während sich die Fahrspurbreite, z. B. bei einer Kurvenfahrt, aus den Schiffsabmessungen und dem Driftwinkel errechnet, den das Fahrzeug zum Kursweg einnehmen muss, damit durch die Schräganströmung des Schiffsrumpfes eine Gegenkraft zur Fliehkraft aufgebaut wird, die das Schiff auf Kurs hält, d. h. aus einem *deterministischen* Ansatz herleiten lässt, beinhalten die

Sicherheitsabstände alle übrigen, z. T. schlecht erfassbaren Einflussparameter auf die erforderliche Fahrrinnenbreite.

Die Sicherheitsabstände umfassen danach

1. den **Querversatz der Fahrzeuge**, der dann auftritt, wenn ein Fahrzeug einen Drehrichtungswechsel vornimmt, z. B. in der Geradeausfahrt, deren Kursachse aus Stabilitätsgründen¹ i. d. R. sinusförmig um eine Mittellage schwingend (Schlängelfahrt) verläuft,
2. die **notwendigen Abstände zum Fahrrinnenrand**, um das Ufer oder allgemein die topografischen Merkmale, an denen sich der Schiffsführer orientiert, erkennen zu können²,
3. die Breiten bei **Überschneidung von Fahrspuren**, z. B. bei Begegnungen in engen Kanälen, die bei der formalen Betrachtung im Interesse der Sicherheit und Leichtigkeit außer Acht gelassen werden – sie reduzieren die erforderliche Fahrrinnenbreite (negative s-Werte) – bzw. die Zusatzbreiten, die erforderlich sind, um den durch die Interaktion der Fahrzeuge bei Begegnungen oder Überholvorgängen geweckten Kräften entgegen zu wirken,
4. die Zusatzbreiten zur Beherrschung von **Ansaugeffekten zum Ufer**, die durch die Beschleunigung des Schiffsumströmungsfeldes im engen Raum zwischen Schiff und Ufer, insbesondere bedingt durch den Propellersog und die zugehörigen Wasserspiegelabsenkungen, entstehen und die zu einem vom Ufer weg weisenden zusätzlichen Driftwinkel führen,
5. im Gegensatz dazu die Zusatzbreiten zur **Kompensation von Abstoßkräften am Bug**, die bei Annäherung des Bugs zum Ufer bei bestimmten Bugformen durch Bugwellenbildung (Aufstauen des Wassers) entstehen können³,
6. die Zusatzbreiten durch Driftwinkel, die notwendig werden, um gegen stationäre **Querströmungen** vorzuhalten, z. B. im Bereich von Buhnen,
7. die Zusatzbreiten durch **Driften gegen den Wind**, wenn sie nicht direkt in der Fahrspurbreite berücksichtigt werden,
8. die bei **kleinen Fahrwasserquerschnitten** ggf. erforderlichen größeren Breiten (wenn die Quer-

schnitte nicht durch größere Tiefe erreichbar sind), damit die Fahrzeuge ein ausreichend bemessenes (fahrbares) Geschwindigkeitsfenster zwischen nautischer Mindestschiffsgeschwindigkeit und kritischer Geschwindigkeit zur Verfügung haben,

9. den Querversatz und die Zusatzbreiten aus ungewollten Driftwinkeln, die bei der Fahrt durch ein **hoch turbulentes instationäres Strömungsfeld** entstehen, z. B. in einer Scherzone an der Einmündung eines Nebengewässers

und schließlich

10. alle durch Unaufmerksamkeiten bis hin zu massiven Fahrfehlern („**human factor**“) entstehenden Zusatzbreiten, um welche die Fahrrinnenbreite vergrößert werden sollte, damit ein toleriertes Kollisionsrisiko nicht überschritten wird. Dabei ist zu beachten, wie lange ein Schiffsführer einer bestimmten kritischen Fahrsituation ausgesetzt ist, wie wahrscheinlich es also ist, dass er Fehler macht.

Die vorgenannten Punkte 1 bis 8 sind überwiegend aus Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen ableitbar, also deterministisch. Die Punkte 9 und 10 dagegen sind überwiegend von nicht deterministischen Einflüssen, z. B. vom momentanen körperlich/mentalenen Zustand bzw. von der Erfahrung und dem Können des jeweiligen Schiffsführers, abhängig.

Nachfolgend wird den die Sicherheitsabstände im Regelfall am stärksten beeinflussenden Punkten 1, 4 bis 6 und 10 anhand von Versuchen mit maßstäblich verkleinerten Modellen mit Schwerpunkt auf dem Einfluss der Uferform (Punkte 4 bis 6) nachgegangen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Sichtbedingungen gut sind, dass der Wind keine Rolle spielt (Beschränkung auf tief abgeladene Schiffe) und dass die Querschnittsverhältnisse ausreichend große Schiffsgeschwindigkeiten v_s zulassen, sodass die Punkte 2, 7 und 8 keinen Einfluss haben. Es werden auch nur Sicherheitsabstände für gerade Gewässerabschnitte angegeben und es werden starke Interaktionen der Fahrzeuge untereinander ausgeschlossen. Alle beteiligten Fahrzeuge müssen somit „in ihrer Spur“ bleiben. Die letzte Annahme gilt nur für ausreichend breit bemessene Fahrrinnen.

3 Betrachtungen zum „human factor“

Das tolerierte Kollisionsrisiko, mit dem der „human factor“ im Grunde quantifiziert werden müsste, ist mit dem von Begegnungen in Standard-Kanalprofilen gemäß deutschen Richtlinien für Regelquerschnitte (1994) vergleichbar. Dies deshalb, weil die Modellversuche gezeigt haben, dass die Modellschiffsführer im Standard-Trapezprofil (T-Profil) eine mit den Richtlinien vergleichbare Verkehrsfläche benötigen und weil sich aus den Modellversuchen, übertragen auf die Randbedin-

¹ Da der Schub hinter dem Schwerpunkt wirkt, hat das Fahrzeug die Tendenz, z. B. bei einer geringen ungewollten Schräglage zur Kursachse, seitlich auszubrechen. Dies zwingt zu dauernden Kurskorrekturen mit wechselnden Drehrichtungen.

² Beispielsweise kann der Schiffsführer eines leeren Fahrzeugs die Wasserlinie eines Spundwandufers z. T. nicht einsehen, was ihn zu größeren Uferabständen zwingt.

³ Die Sicherheitsabstände sind somit von der Konstruktion des Schiffs abhängig. Streng genommen gelten die hier ermittelten s-Werte somit nur für den einen untersuchten Modellschiffstyp, einen Zwei-Schrauber mit Keilspantbug.

gungen in Standard-Profilen, nahezu identische Sicherheitsabstände für Begegnungen errechnen, siehe hierzu Kapitel 7. Die Modellschiffsführer verhalten sich also bei Begegnungen wie reale Schiffsführer, d. h. naturähnlich!

Dies kann auch für Richtungsverkehr vorausgesetzt werden. Deshalb ist anzunehmen, dass auch die zugehörigen Sicherheitsabstände der Modellversuche für Richtungsverkehr denen der Natur entsprechen, wenn auch keine Vergleichsmöglichkeit wie für Begegnungen besteht und deshalb die Quantifizierung des „human factor“ nicht möglich ist. Dies wäre gerade für Richtungsverkehr allerdings noch wichtiger als für Begegnungen. Letztere stellen auch in stark befahrenen Wasserstraßen eine Ausnahmesituation dar, die mit hoher Konzentration gefahren wird. Entsprechend gering können die Sicherheitsabstände dort angesetzt werden.

Diese hohe Konzentration kann für lange Strecken mit Richtungsverkehr aber nicht gefordert werden. Wäre dies nötig, würden die Schiffsführer zwangsläufig Fahrfehler machen. Das Kollisionsrisiko im Richtungsverkehr ist somit von der **Länge** der Strecke mit Richtungsverkehr abhängig, die bei den Modellversuchen der Versuchsanstalt Oberrach durch den Versuchsaufbau vorgegeben war. Sie ist zudem zu kurz, um darauf aufbauend statistische Untersuchungen zum Kollisionsrisiko für eine lange Strecke mit Richtungsverkehr anstellen zu können. Deshalb ist die Relation zwischen den erforderlichen Sicherheitsabständen für Begegnungen

nachfolgend s_B genannt, und solchen für Richtungsverkehr s_R aus den Modelluntersuchungen nicht direkt ableitbar, selbst wenn sich die Modellschiffsführer „naturähnlich“ verhalten. Deshalb wird hier der folgende pragmatische Weg vorgeschlagen: Im Richtungsverkehr wird dem Schiffsführer die Möglichkeit eröffnet, eine reguläre Schlängelfahrt auszuführen. Der zugehörige Raumbedarf R ergibt sich geometrisch aus Bild 2.

Es zeigt einen angenommenen, aus Kreisbögen zusammengesetzten Schiffspfad, dem das Schiff tangential im taktischen Drehpunkt folgt [Dettmann 2001]. Hieraus ergibt sich, dass das Schiff um das gleiche Maß zur einen wie zur anderen Seite der Kursachse ausschwenken muss, wenn die Zusatzbreite aus Driften, wie später noch gezeigt wird, eine Konstante ist, siehe Bild 2. Das Maß des Ausschwenkens ist dabei um so größer, je weiter der taktische Drehpunkt⁴ zum Bug verschoben ist. Der Raumbedarf R , der in Bild 2 definiert ist, ergibt sich dabei für kleine Driftwinkel α_B (Winkel im Bogenmaß) in Abhängigkeit der Fahrspurbreite b_{FS} und der Schiffsbreite b_S aus

$$R = 2 (b_S / 2 + \alpha_B c_F L).$$

Die Zusatzbreite aus der Schlängelfahrt Δb_{Schl} , also das Maß, um das der Raumbedarf größer als die Fahrspurbreite ist, ergibt sich mit

$$b_{FS} = b_S + \alpha_B L \quad \text{zu}$$

$$\Delta b_{Schl} = R - b_{FS} = (2 c_F - 1) (b_{FS} - b_S).$$

Die Sicherheitsabstände gemäß Definition der VAO erf a_{VAO} , die in Bild 2 aus der Differenz des maximalen Uferabstandes $\max a$ und der Fahrspurbreite b_{FS} errechnet werden und für eine sichere Fahrt im Richtungsverkehr stehen, sind danach um Δb_{Schl} (4,1 m für das Großmotorschiff (GMS) bei $c_F = 1,0$ und 3,3 m für den SV mit $c_F = 0,9$) zu reduzieren, um Mindestwerte des Sicherheitsabstandes für Ausnahmesituationen, wie für Begegnungen, zu erhalten.

Die Definition von erf a_{VAO} entspricht dabei dem Mehr an erforderlicher Breite zum Ufer gegenüber der Fahrspurbreite. Alternativ hätte $\min a$ verwendet werden können, das aber nur bei einem geraden Uferverlauf Sinn macht, denn zur Ermittlung der Sicherheitsabstände zu Buhnen, für die die Untersuchungen eben-

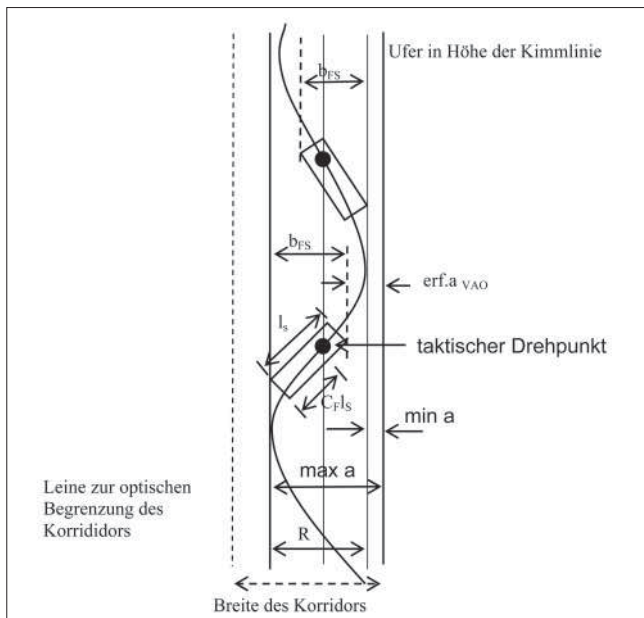


Bild 2: Kinematik der Schlängelfahrt, angewendet auf die Versuchsbedingungen in der VAO gemäß Bild 6, bei denen die Schiffe im Korridor zwischen Leine und Ufer fahren und zugehörige Definition des Sicherheitsabstandes (erf. a_{VAO}) nach VAO aus der Differenz von $\max a$ und b_{FS}

⁴ Die vom Heck zum Bug gemessene und auf die Schiffslänge bezogene Lage des taktischen Drehpunktes wird c_F genannt. Nach Untersuchungen von Dettmann (2001) beträgt c_F im Stillwasser ca. 0,9 für einspurige Schubverbände SV und 1,0 für GMS. Da man sich die Schlängelfahrt bei Strömung als zur Strömung überlagerte Bewegung vorstellen kann, können die vorgenannten c_F -Werte in erster Näherung auch für strömende Gewässer angesetzt werden.

falls genutzt wurden, hätte min a negative Werte annehmen können, denn die Fahrzeuge fahren im Notfall auch in die Bühnenfelder hinein.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass zwischen kleineren Sicherheitsabständen für Ausnahmesituationen, z. B. Begegnungen (s_B), und größeren für „Normalfahrt“ über lange Strecken, z. B. für Richtungsverkehr (s_R), unterschieden werden muss. Dabei können die geringeren Werte auch nur dann in Ansatz gebracht werden, wenn weitere störende Einflüsse auf die Schifffahrt, wie Windquerkräfte, ausgeschlossen werden können. Ist dies aber doch der Fall, z. B. bei schlechter Sicht, dann muss der Querversatz aus der Schlängelfahrt auch bei Begegnungen berücksichtigt werden, denn es kann nicht vorausgesetzt werden, dass sich beide Fahrzeuge zu Beginn der Begegnung in einer fahrdynamisch gesehen optimalen Fahrposition befinden. Dies ist zumeist in Fließgewässern mit unregelmäßigem Uferverlauf der Fall, bei denen schon der Einfluss der Turbulenz zu einem ungewollten Querversatz führen kann. Deshalb werden vorbehaltlich weiterer Untersuchungen, möglichst in der Natur und entsprechend vorliegender Informationen für max. zweispurigen Verkehr, folgende Bemessungsansätze zur Berücksichtigung des „human factor“ vorgeschlagen:

1. Für Fahrrinnen, die für **Begegnungsverkehr** vorgesehen sind, können die (kleineren) Sicherheitsabstände s_B ohne Schlängelfahrtanteil angesetzt werden, wenn zusätzlich folgende Bedingungen erfüllt sind: Regelmäßiger Uferverlauf, gute Sicht auf die Strecke und andere Verkehrsteilnehmer. Die Fahrrinnenbreite ergibt sich dann aus den Fahrspurbreiten der beiden beteiligten Fahrzeuge, dem Sicherheitsabstand Schiff-Schiff und den beiden Sicherheitsabständen s_B zu den Ufern.
2. Bei **Richtungsverkehr** sollte der Schlängelfahrtanteil s_R berücksichtigt werden. Da der Versatz aus der Schlängelfahrt nur ein Mal berücksichtigt werden muss und s_R an beiden Ufern anfällt, entspricht s_R dem Mindestwert bei Begegnungen plus halbem Schlängelfahrtanteil: $s_R = s_B + \Delta b_{\text{Schl}} / 2$.
3. In Fahrrinnen, in denen **Überholvorgänge** zugelassen werden sollen, ist zu berücksichtigen, dass beide Fahrzeuge sowohl vom Ufer als auch von anderen Schiff angesogen werden können. Die Überholung zweier Fahrzeuge kann deshalb näherungsweise wie zwei parallele Richtungsfahrten behandelt werden. Die Zusatzbreite für Schlängelfahrt ist dann für die beiden Spuren der beteiligten Fahrzeuge zu berücksichtigen. Eingerechnet in die Sicherheitsabstände zum Ufer ist deshalb an jedem Ufer ein Sicherheitsabstand von $s_U = s_B + \Delta b_{\text{Schl}}$ anzusetzen.
4. Gleiches gilt für **Begegnungen in Strecken mit unregelmäßigem Uferverlauf, bei starker Strömung sowie bei schlechter Sicht**. Auch sollte

Δb_{Schl} in beiden Spuren angesetzt werden, entsprechend $s_U = s_B + \Delta b_{\text{Schl}}$.

4 Quantifizierung von Sicherheitsabständen in Regelprofilen

In den deutschen Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen werden für **Begegnungen** moderner GMS (Länge $L = 110$ m, Breite $B = 11,4$ m, Tiefgang bis 2,8 m) untereinander mit bzw. daraus zusammengestellten Schubverbänden SV ($L = 185$ m, sonst wie GMS) und für Begegnungen SV–SV folgende Komponenten der Fahrrinnenbreite ausgewiesen:

- Fahrspurbreite $b_{\text{FS}} = 15,5$ m im Trapezprofil, 16 m im Rechteckprofil
- Sicherheitsabstand Schiff–Schiff $s_{\text{SS}} = 2,0$ m
- Sicherheitsabstand Schiff–Ufer für Begegnungen s_{UB} beidseitig je 1,5 m für bzw. je 4,0 m für senkrechte Ufer (Rechteck- oder R-Profil).

Hieraus errechnet sich eine erforderliche Fahrrinnenbreite von $2 \times 15,5 + 2 + 2 \times 1,5 = 36$ m für die Böschung, die bei einem fahrdynamischen Einsinken von 0,35 m, also einer Tauchtiefe von max. 3,15 m (für 2,8 m Tiefgang), bei einer Böschungsneigung von 1:3 ($m = 3$) einer Wasserspiegelbreite von $36 + 2 \times (3 \times 3,15) \approx 55$ m, also der Breite des Standardprofils entspricht. Im R-Profil ergibt sich aus $2 \times 16 + 2 \times 4 = 42$ m direkt die Standardbreite.

Dies ist natürlich kein Zufall, denn die Sicherheitsabstände s_i („i“ steht für die Indizes SS bzw. UB) wurden in Umkehrung der eingangs genannten Bemessungsformel für die erforderliche Fahrrinnenbreite

$$\text{erf. } b_F = \sum b_{\text{FS}} + \sum s_i$$

aus den **vorhandenen** Regelabmessungen von Kanälen **rückgerechnet**, nachdem sich aus Fahrversuchen erwies, dass die Regelprofile, die ursprünglich für eine wirtschaftliche Fahrt von Europaschiffen (ES) ($L = 85$ m, $B = 9,5$ m, $T = 2,5$ m) dimensioniert und gebaut wurden, auch mit modernen GMS und SV befahrbar sind, wenn auch mit einer gewissen Kollisionswahrscheinlichkeit (BAW, 1992).

Die vorgenannten Sicherheitsabstände können somit Kollisionen Schiff–Schiff oder Schiff–Ufer nicht verhindern, sondern nur begrenzen. Sie werden im Notfall also auch beansprucht und ggf. aufgebraucht, um zusätzlichen Navigationsraum zur Verfügung zu haben. Insofern wäre der Begriff: „Reserve“ besser als der gebräuchlichere „Sicherheitsabstand“. Die Analyse von Unfällen zeigt überdies, dass die meisten Unfälle aus Fahrfehlern resultieren und dies sogar bei mehr als ausreichenden Breiten, wie am Niederrhein. Selbst äußerst üppig bemessene Sicherheitsabstände können Havarien somit nicht verhindern. Deshalb und aus

Wirtschaftlichkeitsgründen sind knappe Sicherheitsabstände, die gemäß gesetzlicher Vorgabe aber immer noch einen sicheren und „leichten“ Schiffsverkehr ermöglichen sollen, zu wählen. Die Begriffe „leicht“ und „sicher“ sind dabei nicht eindeutig definiert. Deshalb wird nachfolgend pragmatisch von folgenden Definitionen ausgegangen:

- „Sicher“ ist eine Fahrt dann, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Schiffe untereinander berühren oder dass Berührungen mit dem Ufer auftreten, in etwa der bei Begegnungen in Standardprofilen entspricht.
- „Leicht“ ist eine Fahrt dann,
 - wenn sie auch bei Manövern nicht unterbrochen werden muss, wobei eine gewisse Fahrtreduktion tolerierbar ist (Ausschluss der „Schleichfahrt“) – Aspekt ausreichende Fahrgeschwindigkeit bzw. ausreichend bemessener Geschwindigkeitsbereich – und
 - wenn es die vorhandenen Breiten erlauben, Kurskorrekturen nur in ausreichend groß bemessenen Zeitintervallen vornehmen zu müssen, damit nicht ständig mit hoher Konzentration gefahren werden muss, d. h., wenn eine Schlingelfahrt mit praxisüblicher Versatzbreite möglich wird.

Streng genommen müssten Sicherheitsabstände somit aus einer großen Anzahl von nautischen Versuchen ermittelt werden, bei denen die Fahrrinnenbreite sukzessive reduziert wird, bis sich Widersprüche zu den o. g. Definitionen ergeben, insbesondere, bis die statistisch aus den Messungen ermittelte Kollisionswahrscheinlichkeit dem tolerierten Wert entspricht. Dies hätte den Rahmen der hier betrachteten Versuche gesprengt. Deshalb wurde nur eine statistisch gesehen geringe Anzahl (im Schnitt 15) von Versuchen pro untersuchter Variante zu Gunsten einer höheren Variantenanzahl durchgeführt und es wurden die Sicherheitsabstände auch nur einseitig, durch Betrachtung eines Ufers/Fahrrinnenrandes, ermittelt, obwohl streng genommen der gesamte Querschnitt betrachtet werden müsste, der dann aber mehrfach hätte umgebaut werden müssen. Auch dies schränkt die Fachaussagen auf „breite“ Querschnitte ein.

5 Diskussion einschlägiger Bemessungsansätze

Um erste Hinweise auf die erforderlichen Sicherheitsabstände zu Uferböschungen in Fließgewässern zu erhalten und um gleichzeitig Hinweise auf relevante Einflussgrößen zu erhalten, werden nachfolgend drei in ihrem Grundansatz völlig unterschiedliche Bemessungsansätze besprochen:

- Die holländischen Empfehlungen für die Bemessung von Kanälen
- Untersuchungen der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg (VBD) für Fließgewässer (Berichte 1369 und 1434 aus den Jahren 1994 und 1997)
- Der PIANC-Ansatz (1995) für „Approach Channels“⁵

Die **holländischen Empfehlungen** geben direkt die erforderliche Fahrrinnenbreite an. Sie unterscheiden dabei nicht zwischen Fahrspurbreiten und Sicherheitsabständen. Beispielsweise wird für das „krap profiel“, das für geringe bis moderate Verkehrsbelastungen vorgesehen ist, eine Breite in Höhe der Kimmlinie von $3 b_s$ gefordert. Das „normaal profiel“ für starken Verkehr erfordert eine Breite von $4 b_s$. Dies gilt für Begegnungsverkehr. Für den Richtungsverkehr wird nur die zweifache Schiffsbreite gefordert.

Werden diese Zahlenwerte auf ein 11,4 m breites Fahrzeug angewendet, ergibt sich z. B. für das krap profiel eine erforderliche Breite in Höhe der Kimm von 34,2 m, die in guter Übereinstimmung steht zu den o. g. 36 m gemäß deutschen Richtlinien. Für starken Verkehr wären diese gemäß holländischer Richtlinie jedoch unterbemessen. Im Richtungsverkehr ergibt sich in Höhe der Kimm eine Breite von 22,8 m. Unter Beachtung der Zusatzbreite aus Schlingelfahrt für ein GMS von 4,1 m würde sich nach dem oben vorgeschlagenen Bemessungsansatz eine Breite von $15,5 \text{ m} + 4,1 \text{ m} + 2 \times 1,5 \text{ m} = 22,6 \text{ m}$ ergeben, was wieder ziemlich genau dem vorgenannten Wert entspricht. Auch die holländischen Richtlinien berücksichtigen somit im Richtungsverkehr einen Querversatz durch die Schlingelfahrt.

Dies galt für Uferböschungen, die, wie in Deutschland, im Bereich $m = 2 - 4$ ausgeführt werden. Für steile Uferböschungen wird ein Sichtzuschlag gefordert, der jedoch nicht quantifiziert ist. Tendenziell ergeben sich jedoch, wie auch in deutschen Richtlinien, größere Sicherheitsabstände für senkrechte Uferböschungen.

Im **Bericht 1369 der VBD** werden die erforderlichen Sicherheitsabstände von der Standardabweichung beobachteter Fahrspurbreitenvariationen abhängig gemacht. Übertragen auf die hier betrachteten Verhältnisse in geraden Flussabschnitten sind die Standardabweichungen in Berg- und Talfahrt nur wenig voneinander verschieden und damit auch nur wenig von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Sie betragen rund 5 m. Dieser vergleichsweise große Wert kommt dadurch zustande, dass nicht nur *ein* Schiffstyp untersucht wurde, sondern dass Messdaten der *gesamten*

⁵ Kanäle, die einen im Inland befindlichen Hafen mit dem Meer verbinden. Die PIANC-Ansätze gelten somit streng genommen nur für moderne Seeschiffe.

beobachteten Fahrzeuge an Donau und Rhein sowie verschiedene Verhältnisse von Tiefgang zu Wassertiefe zusammen betrachtet wurden. Dabei wurde angenommen, dass die Standardabweichung von der Schiffsbreite unabhängig ist.

Die Sicherheitsabstände werden dabei als Vielfaches der Standardabweichung angesetzt, wobei der Multiplikator, der „Toleranzfaktor“, anhand vorhandener Breiten in Streckenabschnitten bemessen wurde, denen ein zwar knapper, aber noch ausreichender Sicherheitsstandard zugeordnet wird, wie die Strecke am Oberrhein. Hieraus ergab sich ein Toleranzfaktor in der Größenordnung von 3. Für Richtungsverkehr errechnet gibt sich daraus ein Sicherheitsabstand von rund 15 m. Für Begegnungsverkehr müssen die Standardabweichungen, um das gleiche Sicherheitsniveau zu definieren, im Sinne des Fehlerfortpflanzungsgesetzes überlagert werden, woraus sich der $\sqrt{2}$ -fache Wert wie für Richtungsverkehr errechnet, also 21,2 m. Umgelegt pro Uferseite ergeben sich somit Sicherheitsabstände von 7,5 m im Richtungsverkehr und 10,6 m im Begegnungsverkehr. Beide Werte sind kleiner als der von der VBD aus Schiffsführerbefragungen gewonnene Schätzwert für den erforderlichen Sicherheitsabstand, der mit einer Schiffsbreite, also 11,4 m, angegeben wird. Er gilt in dieser Höhe gleichermaßen für zweispurige Fahrzeuge sowie zu Böschungen und Bühnenköpfe. Maßgebend sind also 11,4 m, es sei denn, der Bühnenabstand ist größer als $2/3$ der Schiffslänge. In diesem Fall wird ein Sicherheitsabstand von pauschal 17,1 m gefordert.

Hieraus würde sich, übertragen auf Kanalverhältnisse, bei einem von der VBD angesetzten Sicherheitsabstand zwischen den Schiffen von 4 m eine Breite in Höhe der Kimm-Linie von 57,8 m ergeben, ein Wert, der nahezu doppelt so groß ist wie der in Standardprofilen vorhandene, wenn von einer Fahrspurbreite von 15,5 m ausgegangen wird. Da dem Ziel der VBD-Untersuchungen entsprechend davon auszugehen ist, dass sie dem Bemessungsansatz 4 im Kapitel 3 entsprechen, also für unregelmäßige Ufer bei Strömung gelten, kann, übertragen auf Kanalverhältnisse, die doppelte Zusatzbreite in Abzug gebracht werden, wobei sich 49,6 m ergeben, ein immer noch sehr großer Wert.

Die Untersuchungen der VBD geben somit wertvolle Hinweise auf die grundsätzlichen Abhängigkeiten der Sicherheitsabstände von relevanten Parametern, z. B. darauf, dass die Strömungsgeschwindigkeit in geraden Flussabschnitten nur einen geringen Einfluss hat. Sie können wegen der großen Standardabweichungen aber die Anbindung des Erfahrungswissens von Flüssen an Kanäle nicht herstellen.

Der zweite oben erwähnte Bericht der VBD gibt ergänzende Hinweise auf die Fahrspurbreite in geraden Flussabschnitten für ein- und zweispurige bzw. ein- und zweigliedrige Schiffe und Verbände in Berg- und Talfahrt. Für große Kurvenradien ist danach der Einfluss von Fahrtrichtung und Strömungsgeschwindigkeit auf die Fahrspurbreiten gering und damit, eingedenk der Streuung der Messdaten, vernachlässigbar. Weiterhin wird deutlich, dass die Fahrspurbreite in Geraden proportional zur Fahrzeugbreite B ist. Diese fundamentalen Zusammenhänge werden im Kapitel 9 genutzt, um Sicherheitsabstände, ausgehend von den Modellversuchen, auf davon abweichende Verhältnisse zu übertragen.

Der **PIANC-Berechnungsansatz** berücksichtigt als Ergebnis einer weltweiten Datensammlung über ausgeführte Kanäle im Sinne eines „best practice“-Ansatzes nachfolgend genannten Einflussgrößen:

- Steuerfähigkeit der Schiffe,
- Schiffsgeschwindigkeit,
- Verkehrsstärke,
- Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang,
- Neigung der Uferböschung,
- Sohlbeschaffenheit,
- Querströmungsgeschwindigkeit,
- Längsströmungsgeschwindigkeit,
- Windgeschwindigkeit bzw. Nähe des Kanals zur Küste,
- Küstennaher oder küstenferner Kanal,
- Wellenhöhe,
- Sichtbedingungen und Navigationshilfen.

Dabei setzt sich die erforderliche Fahrrinnenbreite, bezogen auf die Standardprofile nach deutschen Richtlinien, zusammen aus

- der Summe der „Basis-Fahrspurbreiten“ der betrachteten Fahrspuren, die für gute bis moderate Steuerfähigkeit des Schiffes zu $1,3 B - 1,5 B$ angesetzt werden,
- der Summe von sogenannten „Zusatzbreiten“, die für jede betrachtete Spur anfallen, z. B. $0,1 B$ für eine glatte, $0,2 B$ für eine raue und harte Sohle, $0,2 B$ für schlechte Ufersicht, wie im R-Profil, kein Zuschlag für gute Ufersicht,
- dem Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen bei geringen Schiffsgeschwindigkeiten⁶ von $1 B$ sowie aus
- den erforderlichen Abständen zum linken und rechten Ufer von $0,3 B$ bei geringen Schiffsgeschwindigkeiten zu geneigten Böschungen bzw. von $0,5 B$ bei senkrechtem Ufer.

⁶ Alle hier betrachteten Schiffsgeschwindigkeiten von Binnenschiffen sind im Sinne der PIANC-Publikation als „gering“ einzustufen.

Wendet man diese Empfehlungen auf den Begegnungsverkehr für das Trapezprofil an, ergibt sich bei glatter Sohle, guter Steuerfähigkeit von GMS bzw. SV und schwachem Verkehr in Höhe der Kimmlinie eine Breite von $4,4 B$, entsprechend $50,2$ m im T-Profil und von $5,4 B$, $61,6$ m im R-Profil. Diese Werte liegen in der Größenordnung der VBD-Angaben, definieren somit einen entsprechend guten Leichtigkeits- und Sicherheitsstandard, der aber, daran sei hier nochmals erinnert, für Seeschiffe gilt, die i. d. R. deutlich schlechtere nautische Eigenschaften haben und vor allem in Bezug zur Tonnage schwächer motorisiert sind als Binnenschiffe.

Im Bezug auf die hier behandelte Frage nach den erforderlichen Sicherheitsabständen zu Uferböschungen in Fließgewässern soll Folgendes festgehalten werden:

- Der Einfluss einer Längsströmung ist nur bei Fließgeschwindigkeiten von weniger als $0,8$ m/s vernachlässigbar. Für langsame Fahrt wird bis $1,5$ m/s ein Zuschlag von $0,2 B$ gefordert. Danach wäre auch in Geraden bei Strömung ein Zuschlag erforderlich.
- Bei $T > 0,7 H$ wird ein allgemeiner Zuschlag von $0,2 B$ und – abhängig von Sohlbeschaffenheit – folgende weitere Zuschläge gefordert: $0,1 B$ für eine glatte und weiche sowie $0,2 B$ für eine raue und harte Sohle. In Kanälen wirkt sich diese Forderung i. d. R. nicht aus, wohl aber für Flüsse, in denen im Bereich von Engpässen mit sehr kleinen Flottwasertiefen gefahren wird.
- Für langsam fahrende Binnenschiffe wird ein Sicherheitsabstand von $0,3 B$ im Falle eines geböschten Ufers und von $0,5 B$ zum senkrechten Ufer gefordert, also $0,2 B$ mehr ($2,3$ m bei einem GMS), was in etwa der Differenz in Standardprofilen entspricht (4 m – $1,5$ m = $2,5$ m).

Zusammenfassend ist als wesentliches Ergebnis festzustellen, dass auf gerader Strecke die Schiffsbreite als die skalierende Größe für die erforderlichen Sicherheitsabstände angesehen wird. Ein doppelt so breites Schiff erfordert somit den doppelten Sicherheitsabstand, während z. B. ein 185 m langer, $11,40$ m breiter Schubverband danach keine größere Breite benötigt als ein Großmotorschiff. Da auch der systematische Anteil der erforderlichen Fahrinnenbreiten in Geraden, also die Fahrspurbreite, u. a. nach VBD-Bericht 1434 proportional zur Schiffsbreite ist, lag es nahe, die hier besprochenen Modelluntersuchungen auf einspurige Fahrzeuge und auf Großmotorschiffe zu begrenzen.

6 Zielsetzung der Untersuchungen

Die Untersuchungen zielen auf eine ohnehin bei Modellen gebotene **vergleichende** Betrachtung, da wegen der folgenden Aspekte keine allgemeingültigen **quantitativen** Ergebnisse zu erwarten waren:

- Die zahlreichen, vorher aufgezählten notwendigen Beschränkungen und Annahmen,
- die fehlende allgemeingültige Quantifizierung der Begriffe „sicher“ und „leicht“,
- der Einfluss des Schiffsführers auf die Sicherheitsabstände („human factor“),
- die Beschränkung auf einen Schiffstyp und
- mögliche Maßstabeffekte auf die Sicherheitsabstände*.

* Die Modelle werden, entsprechend der Dominanz der Schwere- und Trägheitseffekte, nach Froude modelliert. Weiterhin wird strikte geometrische Ähnlichkeit gefordert. Damit wird erreicht, dass die Relation der beiden vorgenannten Kräfte in Modell und Natur gleich ist, wodurch die von diesen Kräften dominierten Strömungen und Wellen ähnlich sind. Bei einem Modellmaßstab von $1:25$ bedeutet dies aber auch, dass Geschwindigkeiten und Zeiten im Maßstab $1:5$ kleiner sind als in der Natur. Der Modellschiffsführer muss also fünf Mal schneller handeln als in der Großausführung und wird deshalb eher Fahrfehler machen. Dafür hat er eine bessere Sicht auf sein Modellschiff und die anderen beteiligten Fahrzeuge. Wegen des Modellfluids Wasser ist aber eine weitere Kraftkomponente, die aus Zähigkeitskräften resultiert, in Modell und Natur nicht identisch und schränkt damit die Modellähnlichkeit ein. Das zugehörige Verhältnis von Zähigkeits- zu Trägheitskräften, das sich in der Reynoldszahl ausdrückt, ist also in Modell und Natur ungleich. Bei hohen Reynoldszahlen in Modell und Natur ist dies nicht bedeutend, da auch die Turbulenz, die das Strömungsfeld, neben Trägheits- und Schwereinfluss prägt, im Wesentlichen von Trägheitskräften und von den geometrischen Randbedingungen bestimmt wird und damit naturähnlich ist. Die Reynoldszahl ist aber an den Antriebs- und Steuerorganen der Modellschiffe nicht so groß, dass ihr Einfluss vernachlässigt werden könnte. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Ruderquerkraft im Modell, hochgerechnet auf den Naturmaßstab, bei großen Ruderwinkeln i. d. R. kleiner ist als in der Natur, vor allem aber, dass bei maßstäblich verkleinerter Drehzahl des Propellers kleinere Schubkräfte auftreten als entsprechende Werte in der Natur. Deshalb muss im Modell in der Regel mit unmaßstäblich größeren Drehzahlen gefahren werden als in der Natur, um ähnliche Schiffsgeschwindigkeiten zu erreichen, was wieder zu verstärktem fahrdynamischen Einsinken am Heck und damit zu verstärkten Ansaugeffekten zum Ufer führen kann. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Modellschiffe deshalb tendenziell nautisch „kritischer“ verhalten als ihre Großausführungen und zusätzliche Nachweise der Modellähnlichkeit erforderlich werden, über die in Kapitel 7 berichtet wird.

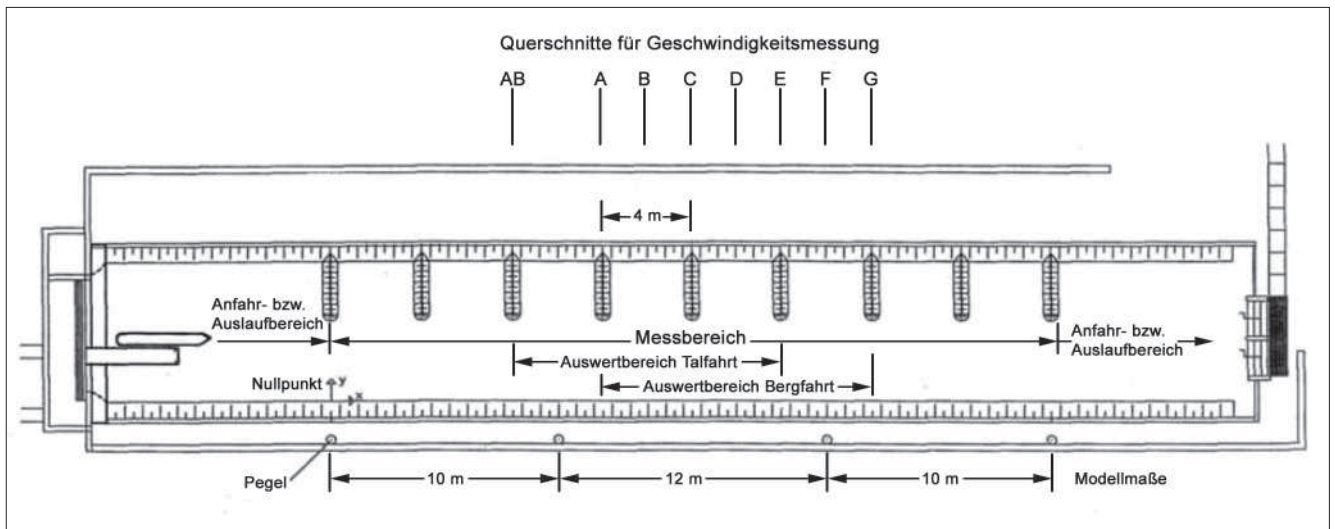


Bild 3: Lageplan der geraden Versuchsstrecke mit Bühnenregelung

Mit den Untersuchungen können aber sehr wohl die **Relationen** von Sicherheitsabständen zueinander mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Es kann z. B. die Frage beantwortet werden, um welches Maß die Sicherheitsabstände zu Böschungen **größer oder kleiner** sind als zu Bühnen.

7 Konzeption und Durchführung der Modellversuche

7.1 Versuchsaufbau

Der Großteil der Versuchsrandbedingungen wurde, entsprechend der ursprünglichen Aufgabenstellungen im Rahmen der ‚Vertieften Untersuchungen zum Donauausbau‘, auf die Verhältnisse an der Donau zwischen Straubing und Vilshofen abgestimmt. Daraus ergaben sich die Hauptabmessungen wie Fahrrinnenbreite und Böschungsneigung des Modells. Darüber hinaus wurden in zahlreichen Zusatzuntersuchungen die Randbedingungen erweitert, um allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

Für die Modellversuche wurde eine gerade Flussstrecke mit einer Länge von 1300 m und einer Breite von 157 m im Maßstab 1:25 aufgebaut, siehe Bild 3. Die Fahrrinne ist einseitig auf der – in Fließrichtung gesehen – linken Seite durch senkrecht zur Flussachse angeordnete Bühnen mit einer Länge von 67 m eingengt. Die Bühnenlänge ergibt sich aus dem Verhältnis von Bühnenlänge zu Bühnenabstand von 2:3 für einen mittleren Bühnenabstand von 100 m. Die Bühnenhöhe ist mit 3,0 m so gewählt, dass die Bühnen bei dem im Modell eingestellten Mittelwasserbedingungen mit Fließtiefen von 3,4 m überströmt und bei Niedrigwasser mit Fließtiefen von 2,6 m nicht überströmt werden. Die Neigung der Bühnenböschung beträgt einheitlich 1:2,5.

Als Uferbegrenzung wurde, bis auf die Versuche zur Bestimmung des Böschungseinflusses auf den Sicher-

heitsabstand, eine 1:3 geneigte Böschung gewählt. Zur Ermittlung des Einflusses der Böschungsneigung wurde zusätzlich noch eine senkrechte Uferbegrenzung erstellt.

7.2 Messtechnik

Bei der vorliegenden Messaufgabe handelt es sich, allgemein ausgedrückt, um eine Positionsbestimmung von bewegten Zielen. Die Messungen erfolgen in einer vorgegebenen Wiederholfrequenz, um die Punktbeziehung dokumentieren zu können. Für kinematische Messvorgänge ergeben sich hohe Anforderungen, wie schnelles Messen bei hoher Genauigkeit und hohe Datenübertragungsraten. Als ideale Lösung zeigte sich, den Schiffspfad mit einem Tachymeter mit integrierter Entfernungsmessung und automatischer Zielverfolgungseinrichtung zu messen. Mit der sogenannten Totalstation kann die Lage des Prismas, welches auf dem Schiff positioniert wurde, relativ zu den Modellkoordinaten gemessen werden. Somit ist eine direkte Messung möglich und ein aufwändiges Nachbearbeiten nicht erforderlich.

In der geraden Versuchsstrecke wurde zur Bestimmung des Driftwinkels und der Lage des Schiffes zusätzlich ein Entfernungsmesser auf das Schiff montiert. Zum Prinzip des Messverfahrens siehe Bild 4.

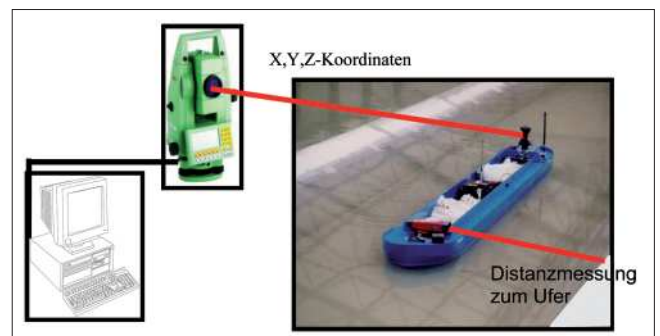


Bild 4: Prinzip des Messverfahrens



Bild 5: Begegnungsfahrt zweier Schubverbände im Standard-Trapez-Profil

7.3 Übertragbarkeit der Modellergebnisse und Modelleffekte

Bei der Übertragbarkeit der Modellergebnisse ist zunächst zwischen Leistungs- und Manövrierverhalten zu unterscheiden. Maßstabsvergleichsuntersuchungen zwischen den Maßstäben 1:16 und 1:25 in der VBD zeigten hinsichtlich der Übertragung des Leistungsbedarfs, der Schubwirkung und der Drehzahl zähigkeitsbedingte Maßstabeffekte, die mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit ansteigen. Zum Einfluss des Maßstabeffektes auf das Fahrverhalten ergibt sich ein anderes Bild. Bei den Versuchen zur Bestimmung des Fahrverhaltens wurde der Raumbedarf für eine Begegnung als maßgebende Kenngröße verwendet. Untersuchungen der VBD zeigten, dass es zwischen den

Raumbedarfswerten der Maßstäbe 1:25 und 1:16 keine signifikanten Unterschiede gibt. Um diese Aussage jedoch noch zu festigen, wurden an der VAO Vergleichsuntersuchungen zwischen Naturmessungen am Main-Donau-Kanal und dem Maßstab 1:25 durchgeführt. Die Naturversuche wurden von der BAW und der VBD zur Untersuchung des Begegnungsverhaltens von Schubverbänden durchgeführt. Die Versuche sind somit prädestiniert für Vergleichsuntersuchungen zur Bestimmung eines Maßstabeinflusses. Eine exakte Übertragung der Schiffsgeschwindigkeiten, Drehzahlen und des Leistungsbedarfs ist für die Fragestellung der Versuche nicht erforderlich.

Die Randbedingungen im Main-Donau-Kanal sind 4 m Wassertiefe, eine Wasserspiegelbreite von 55 m und eine Böschungsneigung von $h:b = 1:3$. Begegnet wurde zwischen zwei Schubverbänden ($L \times B = 185 \text{ m} \times 11,4 \text{ m}$), oder zwischen einem Schubverband und einem GMS ($L \times B = 100 \text{ m} \times 11,4 \text{ m}$) mit 2,5 m Abladetiefe. Die Schiffsgeschwindigkeiten bewegten sich zwischen 7 km/h und 10 km/h durch das Wasser. Im Modell wurde die Begegnung zwischen zwei Schubverbänden gefahren (vgl. Bild 5).

Die Auswertung erfolgte für den Raumbedarf und die Abstände zum Ufer. Die Raumbedarfswerte für die Auswertung der VBD und BAW sowie für den Modellversuch der VAO sind in Tabelle 1 angegeben.

Die Varianten bzw. Standardabweichungen sind nach der statistischen Analyse alle aus einer gemeinsamen Grundmenge und die Abweichungen sind zufälliger Art.

	Begegnung SV/SV VAO (Modell)	Begegnung SV/SV BAW (Natur)	Begegnung SV/SV VBD (Natur)	Begegnung SV/SV oder SV/GMS BAW (Natur)	Begegnung SV/SV oder SV/GMS VBD (Natur)
Mittelwert Raumbedarf	33,6 m	33,6 m	34,5 m	33,0 m	34,4 m
Standardabweichung	1,23 m	0,83 m	1,02 m	1,00 m	0,91 m
Anzahl der Fahrten	18	4	4	10	11

Tabelle 1: Raumbedarfswerte aus Modell- und Naturmessungen für das Standard-T-Profil

Die Mittelwerte entstammen für den Vergleich der Begegnung Schubverband mit Schubverband ebenfalls derselben Grundgesamtheit. Bei der Zusammenlegung der beiden Begegnungsarten, um die Anzahl der Versuchsfahrten und somit die Aussagesicherheit zu erhöhen, zeigen sich auch die Versuche der VAO und VBD sowie VAO und BAW aus derselben Grundgesamtheit. Die Abweichungen zwischen den Werten der VBD und der BAW sind auf Grund unterschiedlicher Messverfahren entstanden.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Raumbedarfwerte der Begegnung im Maßstab 1:25 naturgetreu nachgebildet werden. Eine Korrektur der Modelldaten bei der Umrechnung in Naturwerte ist, auch vor dem Hintergrund der Messgenauigkeit, deshalb nicht erforderlich.

7.4 Versuchsdurchführung

Die Einzelfahrversuche in der Geraden wurden zur Bestimmung des erforderlichen Sicherheitsabstandes zum Fahrinnenrand durchgeführt. Der Sicherheitsabstand lässt sich nur ermitteln, wenn bei den Versuchen auch Grenzsituationen vorliegen, die den Schiffsführer zwingen, möglichst nahe an den Fahrinnenrand ohne Havarie heranzufahren. Zur Bestimmung der Grenzsituation muss die Fahrinnenbreite solange reduziert werden, bis eine Havarie nicht mehr zu vermeiden ist. Die Fahrinneneinschränkung darf jedoch nicht zu Lasten des zur Verfügung stehenden Fahrwassers gehen. Deshalb wurde wie folgt vorgegangen: Die Fahrrinne wurde mit einer Leine optisch schrittweise um 2,5 m eingengt, bis das Schiff gegen das Ufer bzw. die Buhne fährt oder der Schiffsführer die vorgegebene Fahrinnenbreite nicht mehr einhalten kann (vgl. Bild 6). Somit werden ein Einfluss einer zweiten Uferbegrenzung und eine Änderung des Fahrwasserquerschnittes umgangen und die Randbedingungen während der Versuchsserie konstant gehalten.

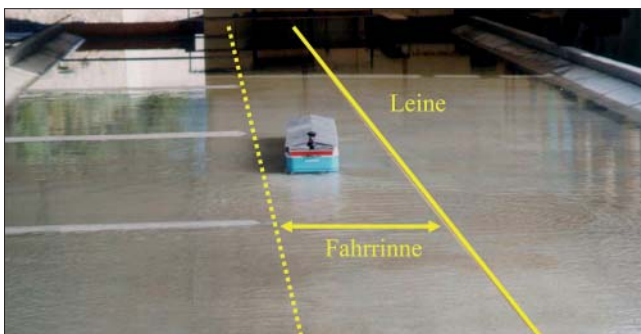


Bild 6: Fahrinnenbegrenzung durch eine Leine

Nach einer sog. „Crash-Fahrt“ wurde die Fahrrinne wieder um 2,5 m (Naturwert) verbreitert, mit der dann mehrere Wiederholungsfahrten durchgeführt wurden. Trat bei den Wiederholungsfahrten eine weitere Kollision auf, so musste die Fahrrinne um einen weiteren Schritt vergrößert werden und mit den Wiederholungs-

fahrten von vorne begonnen werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass dem Steuermann mit der Leine eine Führung vorgegeben wird, an der er sich während der Fahrt orientieren kann und die Fahrt sich somit vereinfacht. Für konstante Versuchsbedingungen sind auch die Startbedingungen der Fahrten mitverantwortlich. Um dies zu gewährleisten, wurde das Schiff bis zum Start an einem Steg festgehalten und auf Kommando des Steuermannes losgelassen. Somit waren immer gleiche Startbedingungen garantiert.

Neben der gespannten Leine besitzt die Versuchssystematik noch weitere Besonderheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Durch die ständigen Wiederholungen und das „Herantasten“ an die Gefahr ergibt sich ein Lern- und Trainingseffekt, der dem Schiffsführer eine zusätzliche Sicherheit verleiht. Für die Untersuchungen standen drei Schiffsführer zur Verfügung, deren Fähigkeiten beim Manövrieren des Modellschiffs die Untersuchungsergebnisse beeinflussen, was einen nicht unerheblichen subjektiven Einflussfaktor darstellt. Weiter tragen auch die Sichtbedingungen erheblich zur Sicherheit bei, z. B. ist zu beachten, dass in Natur durch Dunkelheit oder Nebel die Fahrten schwieriger werden und damit die Sicherheit abnimmt.

8 Auswertung im Hinblick auf die Sicherheitsabstände zu Uferböschungen

Wie eingangs anhand der bestehenden Berechnungsgrundlagen diskutiert wurde, ist für moderate Strömungsgeschwindigkeiten bei der Fahrt entlang eines geraden, geböschten Ufers davon auszugehen, dass die Fahrspurbreiten, die zunächst betrachtet werden, von den variierten Parametern wie Schiffsgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit, Tiefgang und Böschungsneigung weitgehend unabhängig sind. Dies zeigen die folgenden Grafiken, auf denen das Verhältnis der beobachteten Fahrspurbreite zur Schiffsbreite als Funktion des Verhältnisses der Schiffsgeschwindigkeit zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit v_{Skrit}^7 für verschiedene Tiefgänge und Böschungsneigungen aufgetragen sind.

Danach ist für alle Schiffsgeschwindigkeiten v_s von weniger als ca. 90 % der kritischen Schiffsgeschwindigkeit, also für eine übliche Fahrweise, eingedenk der Messwertstreuung kein Einfluss der vorgenannten Parameter erkennbar. Die relativen Fahrspurbreiten schwanken allerdings zwischen dem 1,2 und 1,5-

⁷ Verdränger können mit wenigen Ausnahmen maximal mit v_{Skrit} fahren. Bei v_{Skrit} wechselt das Umströmungsfeld des Schiffes vom strömenden in den schießenden Abflusszustand, bei dem der Absenk und damit Ansaugeffekte zum Ufer stark ansteigen. Für Fahrten in der Nähe von v_{Skrit} müssten somit größere Sicherheitsabstände angesetzt werden.

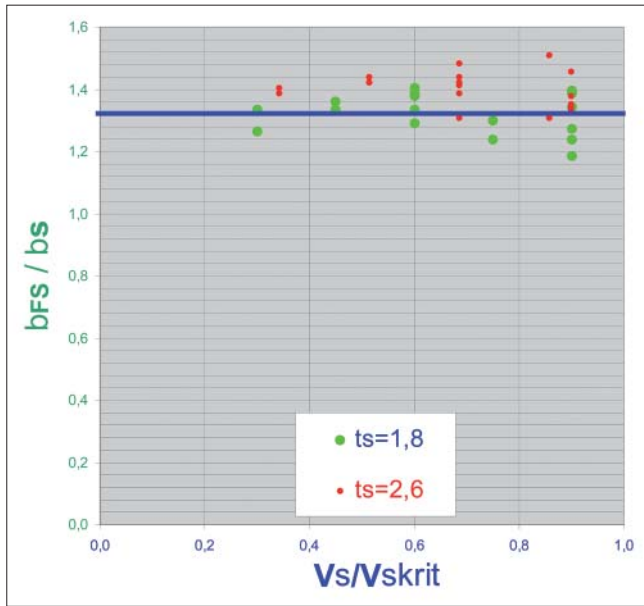


Bild 7: Abhängigkeit der relativen (auf b_S bezogenen) Fahrspurbreite b_{FS} von v_S zu v_{Skrit} für Abladetiefen $T = 1,8$ und $2,6$ m. Die blaue Linie liegt bei $b_{FS} / b_S = 1,36$.

fachen der Schiffsbreite, im Mittel ergibt sich ein Wert von ziemlich genau $1,36 \times$ der Schiffsbreite, entsprechend ca. $15,5$ m für das GMS, also genau dem Wert, der in den deutschen Richtlinien genannt ist. Damit ist b_{FS} nach Bild 7 und Bild 8 für GMS und nach Kapitel 5 für alle einspurigen Fahrzeuge mit $B = 11,4$ m bekannt. Übertragen auf zweispurige Fahrzeuge ergibt sich die doppelte Breite, also 31 m.

Im nächsten Schritt der Auswertung wurden nun die Sicherheitsabstände gemäß Definition der VAO (Bild 2) über relevante Einflussparameter aufgetragen. Dabei wurden in Bild 9 die ermittelten Einzelwerte von

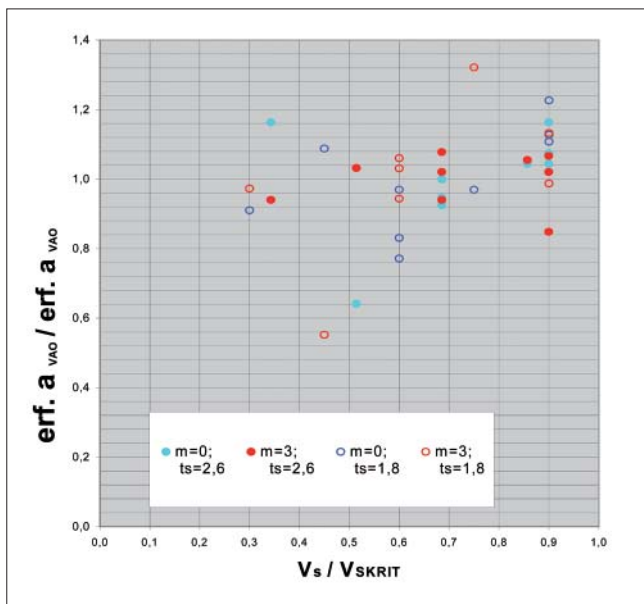


Bild 9: Abhängigkeit des auf den jeweiligen Mittelwert einer Versuchsserie bezogenen Sicherheitsabstandes $erf. a_{VAO}$ von v_S / v_{Skrit} , dem Tiefgang $t_s = T$ und dem Kotangens der Böschungsneigung m

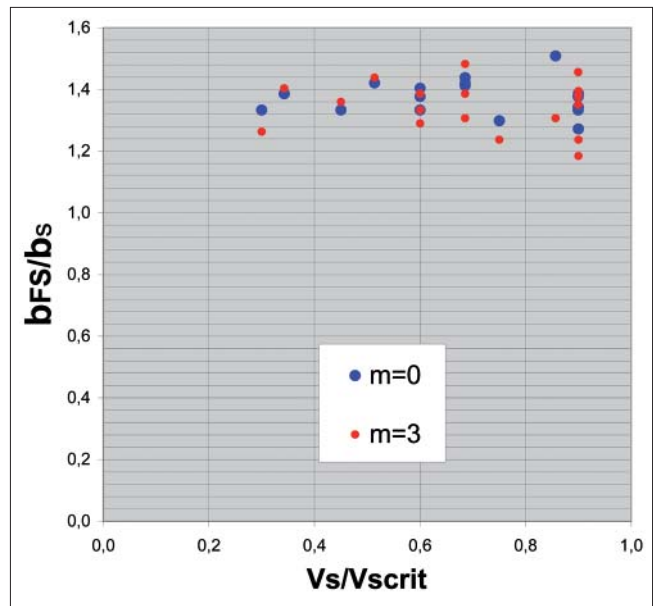


Bild 8: Abhängigkeit der relativen Fahrspurbreite b_{FS} von v_S / v_{Skrit} und dem Kotangens der Böschungsneigung m .

erf a_{VAO} (die jeweils dem Mittel eines Datenkollektivs von rund 15 Versuchsfahrten entsprechen) auf den entsprechenden Mittelwert der jeweiligen Versuchsserie, die sich durch unterschiedliche Tiefgänge bzw. Böschungsneigungsunterschied unterschieden, bezogen. Auf der horizontalen Achse ist als Einflussgröße wieder das Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit aufgetragen.

Die Messdaten streuen sehr stark. Dies liegt vor allem daran, dass die Schiffsführer im zwar eingegengten, aber immer noch ausreichend bemessenen Korridor zwischen gespannter Leine und Bühnenköpfen einen ausreichenden Manövrierraum besitzen, der auch ausgeschöpft wurde: Eingedenk der Messwertstreuung ist jedoch kein signifikanter Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit erkennbar. Der Sicherheitsabstand $erf. a_{VAO}$ ist aber in hohem Maße von T und m abhängig. Dies wird auf Bild 10 am Beispiel des Tiefgangeinflusses deutlich.

In erster Näherung sind die erforderlichen Sicherheitsabstände somit von der Schiffsgeschwindigkeit v_S unabhängig und sie steigen mit dem Tiefgang sowie mit Kotangens der Böschungsneigung m an. Die Unabhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit erklärt sich aus der Tatsache, dass jede Versuchsserie mit einer angestrebten konstanten Drehzahl n gefahren wurden und dass Kurskorrekturen möglichst nur durch Ruderwinkeländerungen, nicht durch Variation der Drehzahl, vorgenommen wurden. Da die Propellerdrehzahl aber in der dritten Potenz von der eingesetzten Motorleistung abhängt, letztere aber wieder in der dritten Potenz von der Schiffsgeschwindigkeit abhängt, ist somit die Drehzahl in etwa proportional zur Schiffsgeschwindigkeit. Da nun der Ruderdruck im Quadrat von der Anströmungsgeschwindigkeit des Ruders abhängt,

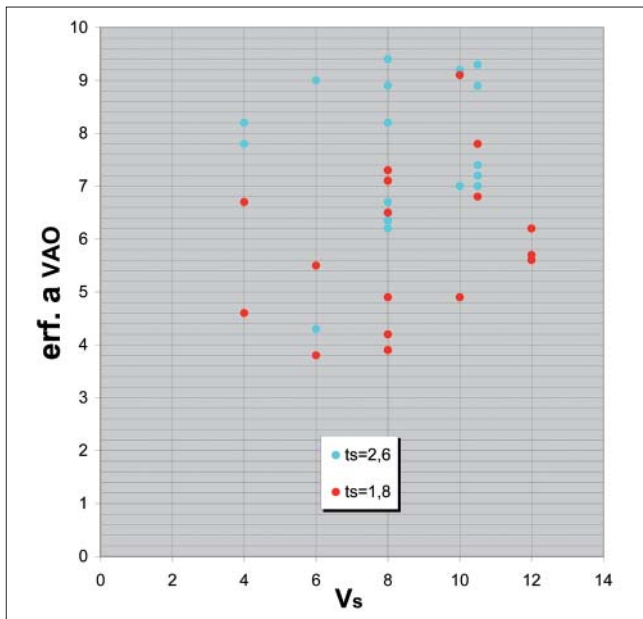


Bild 10: Abhängigkeit des Sicherheitsabstandes erf. a_{VAO} (Angabe in m) von der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_s (in km/h) für verschiedene Tiefgänge des Versuchsschiffes

die wieder in erster Näherung proportional zu v_s ist, wächst somit der Ruderdruck proportional zur Drehzahl im Quadrat an. Die Kraft, mit der das Schiffheck bei Annäherung an das Ufer angesaugt wird, wächst nun gleichfalls in erster Näherung mit v_s^2 , da der Wasserspiegelabsenk mit Ausnahme der Nähe zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit in etwa mit v_s^2 wächst bzw. mit n^2 . Damit erhöht eine größere Drehzahl bzw. ein größeres v_s gleichermaßen die Ruderquerkraft wie die Ansaugkraft zum Ufer. Der Einfluss von v_s wird dadurch kompensiert.

Der Einfluss des Tiefganges kann analog erklärt werden. Je größer dieser ist, desto enger wird der Rückströmungsquerschnitt neben dem Schiff und desto größer die Ansaugkraft. Einen ähnlichen Einfluss hat die Böschungsneigung. Entscheidend ist hierbei der „Rest-Abflussquerschnitt“ zwischen Schiff und Ufer, der mit m variiert.

Diese Überlegungen, zusammen mit den in Kapitel 5 diskutierten Bemessungsansätzen, die eine grundsätzliche Proportionalität der Sicherheitsabstände zur Schiffsbreite unterstellen, legen den Schluss nahe, dass der „Restquerschnitt“ zwischen Schiff und Ufer proportional zum eingetauchten Schiffsquerschnitt am Hauptspant (T B) sein muss, der die Größe der Rückströmung im ufernahen Bereich bestimmt, um eine sichere Fahrt zu ermöglichen.

Theoretische Überlegungen, die, um den Rahmen der Publikation nicht zu sprengen, hier nicht dargelegt werden sollen, kommen im Grundsatz zum gleichen Ergebnis, wobei weitere Einflussparameter hinzukommen, wie die Anzahl der Schiffsschrauben, die Größe und Konstruktion der Ruder, die Motorisierung pro

Ladungstonne und die Fahrzeuglänge, um die wichtigsten Einflussgrößen zu nennen. Da die Fahrzeuge aber bestimmte nautische Mindestanforderungen erfüllen müssen, z. B. dürfen bestimmte Stoppweglängen nicht überschritten werden, was eine Motorisierung erfordert, die mit der Tonnage steigt, oder es müssen Ausweichmanöver in bestimmten Zeiten bewältigt werden, was wieder die Ruderfläche in Abhängigkeit von der Größe der Fahrzeuge bestimmt, haben die vorgenannten zusätzlichen Einflussgrößen nur einen begrenzten, nachgeordneten Einfluss. Dies heißt nicht, dass es nicht nautisch gute oder schlechte Schiffe gäbe, insbesondere was den Ansaugeffekt zum Ufer betrifft. Wichtig ist deshalb, dass die Untersuchungen mit **typischen** Schiffen durchgeführt werden, für die die Fahrrinne bemessen werden soll. Auch dieses Kriterium war bei den Modellversuchen der VAO erfüllt. Unter der Annahme, dass die Querschnittsfläche unter dem Schiff wegen der Grenzschichtentwicklung am Schiffsrumpf und der starken Verwirbelungen im Heckbereich nur bedingt zur Abfuhr der rückströmungs- und propulsionsbedingten induzierten Zusatzgeschwindigkeiten, die den dominanten Ansaugeffekt am Schiffsheck bestimmen, zur Verfügung steht, ist somit eine direkte Proportionalität des neben dem Schiff befindlichen Restquerschnittes A_U , der in Bild 11 dargestellt ist, zu B T zu erwarten.

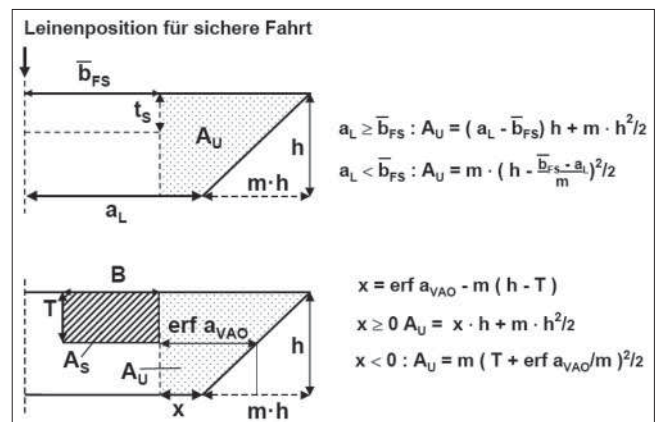


Bild 11: Ermittlung des Restquerschnittes zwischen Schiffseitenwand und Ufer A_U aus Angaben zur Leinenposition a_L und erf a_{VAO} .

Eine diesbezügliche Auswertung ist in der Tabelle 2, ausgehend von den Mittelwerten von erf a_{VAO} der vier Versuchsserien (Variation T und m) vorgenommen worden. Alternativ zur Angabe der erf a_{VAO} – Werte wurde die Restquerschnittsfläche A_U indirekt aus den Leinenpositionen, die eine sichere Fahrt im Korridor erlaubten, ermittelt. Die zugehörigen Abstände a_L zwischen Böschungsfuß und Leine gemäß Bild 10 sind gleichfalls in der Tabelle angegeben. Um A_U zu definieren, muss hiervon noch die mittlere Fahrspurbreite b_{FS} mit 15,5 m in Abzug gebracht werden. Der zugehörige Abstand vom Ufer gibt somit, in Analogie zu erf a_{VAO} , das Mehr an Breitenbedarf gegenüber der Fahrt mit normalem Driftwinkel an.

m	T	h	B	a _L	n _{eff}	Mittel erf a _{VAO}	n _{eff}
3	1,8	3,4	11,4	15,0	0,76	6,9	1,19
3	2,6	3,4	11,4	20,0	1,10	8,7	1,33
0	1,8	3,4	11,4	22,5	1,16	5,1	0,85
0	2,6	3,4	11,4	22,5	0,80	6,7	0,77
Mittel n _{eff} : aus a _L : 0,96 ; aus erf a _{VAO} : 1,04 ; für m=3 : 1,10 ; für m= 0: 0,90 ; alle: 1,00 ± 0,21							

Tabelle 2: Auswertung der Modellversuche nach der Rest-Querschnittsfläche A_U zwischen Schiffseitenwand und Ufer mit zugehörigem n_{eff} = A_U / (B T); Längen in m

Profil	h	B	T	erf a _{VAO}
T	4,0	11,4	2,5	5,6
T	4,0	11,4	2,8	5,4
R	4,0	11,4	2,5	7,1
R	4,0	11,4	2,8	8,0

Tabelle 3: Prognose des Sicherheitsabstandes zu Uferböschungen für Richtungsverkehr s_R = erf a_{VAO} für Standard-T- (m = 3) und R- (m = 0) Kanalprofile und moderne GMS bzw. SV mit 2,5 m und 2,8 m Abladetiefe; Längen in m

Die Auswertung nach A_U und dem zugehörigen „effektiven“ Querschnittsverhältnis n_{eff} = A_U / (B T) erweist sich dabei als nahezu unabhängig davon, wie A_U ermittelt wurde, über die Leinenposition oder erf a und ist auch nur wenig von m abhängig. Die Streuung der n_{eff}-Werte liegt bei ca. ± 21 %, ein Wert, der in Anbetracht des Datenumfanges und des „human factor“ vertretbar ist.

Der errechnete Mittelwert von n_{eff} liegt ziemlich genau bei 1,0! Dies bedeutet:

Zwischen Schiff und Ufer muss, um eine sichere Fahrt im Richtungsverkehr zu ermöglichen, mindestens der Querschnitt des eingetauchten Schiffes vorliegen!

Wird diese Bemessungsregel auf die Verhältnisse in den deutschen Standard-Ausbauprofilen von Kanälen angewendet, dann ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Sicherheitsabstände erf a_{VAO}. Sie liegen für Richtungsverkehr zwischen 5,4 m für 1:3 geneigte Uferböschungen und 8 m für m = 0.

Wird hiervon, entsprechend den Betrachtungen in Kapitel 3, die Breite der Schlängelfahrt abgezogen, um den unteren Grenzwert der Sicherheitsabstände für Begegnungen in Kanälen zu erhalten, ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Werte, wobei zwischen den Tiefgängen von T = 2,5 m und 2,8 m und GMS und SV unterschieden wurde. Danach liegen die errechneten „Netto-Sicherheitsabstände“ s_B zwischen 1,3 m und 2,3 m für m = 3 bzw. zwischen 3,0 m und 4,7 m für m = 0, im Mittel bei 1,8 m bzw. 3,9 m, was sehr gut mit den in den Richtlinien genannten Werten von 1,5 m für m = 3 und 4,0 m für m = 0 übereinstimmt.

Die Ergebnisse der Modellversuche stehen somit im Einklang mit vorliegenden Richtlinien für Kanäle. Dies rechtfertigt eine Prognose von Sicherheitsabständen für davon abweichende Randbedingungen.

9 Prognose von Sicherheitsabständen zu Uferböschungen und Ausblick

Zunächst soll der für die Praxis wichtige Sonderfall eines flach geneigten Ufers betrachtet werden, wie es an Fahrrinnenrändern, die nicht an Regelungsbau-

Profil	GMS (L=110, B=11,4)		SV (L=185, B=11,4)	
	T=2,5	T=2,8	T=2,5	T=2,8
T	1,5	1,3	2,3	2,1
R	3,0	3,9	3,8	4,7

Tabelle 4: Prognose des Sicherheitsabstandes zu Uferböschungen für Begegnungsverkehr s_B = erf a_{VAO} - Δb_{FSchl} für Standard-T- (m = 3) und R- (m = 0) Kanalprofile und moderne GMS bzw. SV mit 2,5 m und 2,8 m Abladetiefe (Δb_{FSchl} = 4,1 m für GMS und 3,3 m für SV); Längen in m

werke grenzen, der Fall ist. Hierbei errechnen sich für eine Wassertiefe von $h = 4$ aus der Bedingung $n_{\text{eff}} = 1$ für 2,8 m tief abgeladene und 11,4 m bzw. 22,8 m breite Fahrzeuge mit $c_F = 1,0$ folgende Böschungsparameter, ab denen kein Sicherheitsabstand bei Begegnungen, guten Sichtbedingungen und regelmäßigem Ufer – Fall 1 in Kapitel 3 – mehr erforderlich ist: $m \approx 5$ für einspurige und 10 für zweispurige GMS und SV. Für Richtungsverkehr mit einer Spur – Bemessungsfall 2 in Kapitel 3 – sind bei diesen Böschungsneigungen folgende Sicherheitsabstände erforderlich: ca. 2,1 m bei ein- und 4,1 m bei zweispurigen Fahrzeugen.

Für 1:3 geböschte Ufer ergeben sich bei sonst gleichen Verhältnissen folgende Werte für den Bemessungsfall 1 nach Kapitel 3: 1,3 m für das einspurige und 5,4 m für das zweispurige Fahrzeug. Für den Bemessungsfall 2 ergeben sich 3,4 m und 9,5 m. Diese Beispiele machen deutlich, dass die Schiffsbreite einen ganz erheblichen Einfluss auf die erforderlichen Sicherheitsabstände hat.

Abschließend sei an einem Beispiel der Einfluss der in Kapitel 3 definierten unterschiedlichen Sicherheitsniveaus verdeutlicht. Hierzu wird die Fahrrinnenbreite ermittelt, die sich bei der Begegnung eines 2,8 m tief abgeladenen, 22,8 m breiten und 110 m langen Koppelverbandes im 4 m tiefen Kanal mit einem entsprechend abgeladenen GMS errechnet. Für gute Sicht und regelmäßige Ufer (Bemessungsfall 1) ergibt sich analog zu den Richtlinien und unter der Annahme, dass sich für im Mittel 1,5-spurige Fahrzeuge ein Sicherheitsabstand Schiff-Schiff von 3 m ergibt, eine erf. Breite von $5,4 + 2 \times 15,5 + 3 + 15,5 + 1,5 = 46,4$ m in Höhe der Schiffskimm. Im Bemessungsfall 4, also in Strecken mit unregelmäßigem Uferverlauf, bei Strömung und solchen Sichtverhältnissen, die eine optimale Abstimmung des Begegnungsvorganges durch beide Schiffsführer erfordern würden, ist den vorgenannten Sicherheitsabständen zu jeder Seite jeweils die Breite der Schlingelfahrt des dem Ufer näheren Fahrzeuges zu addieren, also insgesamt $3 \times 4,1 = 12,3$ m, woraus sich eine Breite von 58,7 m errechnet. Bei einer Fahrt im Bereich von Buhnenfeldern, die insbesondere bei langsamer Bergfahrt große Sicherheitsabstände erfordert, würden sich noch größere Fahrrinnenbreiten ergeben.

Zuletzt sei angemerkt, dass der vorliegende Beitrag, der im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Bingen und des Wasserstraßen-Neubauamtes Berlin erstellt wurde und hinsichtlich der Sicherheitsabstände zu Buhnen fortgeschrieben werden sollte, erst der Anfang einer Serie von ergänzenden Untersuchungen sein kann. Diese sollten, um Maßstabeffekte und den wichtigen Einfluss von Uferform und Sicht besser als in Modellversuchen erfassen zu können, möglichst in der Natur erfolgen.

10 Zusammenfassung

Modelluntersuchungen zur Fahrdynamik von Binnenschiffen in geraden Flussabschnitten bei ufernaher Fahrt, die an der Versuchsanstalt Oberrach der TU-München (VAO) im Maßstab 1:25 durchgeführt wurden, zeigen, dass die Fahrspurbreite eines Großmotorschiffes (GMS) nur wenig von den variierten Parametern wie eingetauchter Schiffsquerschnitt bzw. Abladetiefe, Schiffsgeschwindigkeit, Fließgeschwindigkeit und Uferform (Böschung, Buhnen) abhängt und deshalb für einen Schiffstyp als Konstante betrachtet werden kann, die mit bisherigen Modell- und Naturuntersuchungen für Kanäle in guter Übereinstimmung steht.

Dagegen hat insbesondere der Parameter eingetauchter Schiffsquerschnitt einen großen Einfluss auf die Sicherheitsabstände zu einem geböschten Ufer. Je größer dieser ist, desto größer ist der notwendige Querschnitt zwischen Schiffsseitenwand und Ufer und damit der Sicherheitsabstand, wobei der ungünstigste Fall eine senkrechte Uferböschung ist.

Die Sicherheitsabstände wurden dabei durch Fahrversuche in einem sukzessiv weiter eingeeengten Fahrwasser zwischen Schiff und Ufer so bestimmt, dass dem Modellschiffsführer noch eine sichere und leichte Fahrt über eine lange Strecke möglich war. Für kurzzeitige Ausnahmesituationen, die mit erhöhter Aufmerksamkeit gefahren werden, können kleinere Sicherheitsabstände als die so ermittelten Werte angesetzt werden. Diese kleineren Sicherheitsabstände wurden aus den vorgenannten Werten für lange Strecken dadurch ermittelt, indem die durchschnittliche Breite des Querschnittes bei einer angenommenen Schlingelfahrt im eingeeengten Fahrwasser in Abzug gebracht wurde. Sie entsprechen den Angaben in den deutschen Richtlinien für Regelquerschnitte bei Anwendung auf die dort beschriebenen Standard-Kanäle für Begegnungsverkehr. Die Modellversuche werden dadurch bestätigt.

11 Literatur

DETTMANN, T.; JURISCH, R.: Beitrag zur Bemessung von Fahrrinnenbreiten in Kanälen und Flüssen; Binnenschiffahrt Nr. 6, Juni 2001

SÖHNGEN, B.: Dimensionierung von Fahrrinnen im Rahmen der Planung von Staustufen; 13. Duisburger Kolloquium für Schiffs- und Meerestechnik, Mai 1992

NEUNER, H.; STROBL, T.: Shipping Navigation Tests to determine the horizontal safety distances from groynes and canal banks; PIANC-Bulletin Nr. 115, Januar 2004