

FuE-Abschlussbericht
Aktualisierung der Kriterien für die
hydraulische Bemessung von Schleusen
B3953.03.04.70007



Januar 2025

FuE-Abschlussbericht

Aktualisierung der Kriterien für die
hydraulische Bemessung von Schleusen

Beginn des Vorhabens: November 2016

Auftragsnummer: BAW-Nr. B3953.03.04.70007

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Binnenbereich
 Referat: Wasserbauwerke
 Auftragsleitung: Dr.-Ing. Fabian Belzner
 Bearbeitung: Dr.-Ing. Fabian Belzner

Karlsruhe, Januar 2025

Copyright: Creative Commons BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

Zusammenfassung

Dieses FuE-Vorhaben beschäftigt sich mit der Vertäuung von Binnenschiffen in Schleusen. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Seilkräfte der Vertäuung in Abhängigkeit von der Schiffskraft. Die Trossenkräfte müssen begrenzt werden, um ein Versagen der Trossen zu verhindern. Im Fall eines Trossenrisses wird die Spannenergie schlagartig frei und es besteht Lebensgefahr durch zurückschnellende Trossenenden. Das FuE-Vorhaben leistet damit einen Beitrag zur notwendigen Überarbeitung der Kriterien für die während einer Schleusung zulässigen Schiffskräfte.

Von der wirkenden Schiffskraft kann nicht direkt auf die wirkende Trossenkraft geschlossen werden, da letztere unter anderem von unbekanntem Parametern wie Trossenlänge, Trossenmaterial und der Vorspannung abhängt. Aus diesem Grund werden Trossen- und Schiffskräfte in einem statistischen Zusammenhang betrachtet. Damit wird das Verhältnis von Trossen- zu Schiffskraft durch einen Verstärkungsfaktor und eine korrespondierende Überschreitungswahrscheinlichkeit ausgedrückt, was eine direkte Bestimmung der zulässigen Schiffskräfte in Abhängigkeit von einem festzulegenden Risiko ermöglicht. Hierfür wurden zunächst mit Monte-Carlo-Simulationen auf Basis eines stark abstrahierten Modells die wirkenden Trossenkräfte bestimmt. Der erzeugte Datensatz wurde zur statistischen Beschreibung der Verstärkungsfaktoren genutzt. Die Zulässigkeit der Abstraktion wurde durch einen Vergleich mit den Ergebnissen eines 3D-numerischen Modells auf Basis des Strömungslösers OpenFOAM® nachgewiesen. Weiterhin wurde der numerische Ansatz durch einen Vergleich mit einem gegenständlichen Modell validiert.

Schlussendlich liefert dieses FuE-Projekt den statistischen Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit eines Trossenbruchs und dem sogenannten Verstärkungsfaktor, der das Verhältnis von wirkender Schiffs- zu wirkender Trossenkraft beschreibt. Die Bruchlast der Trossen ist in der Europäischen Union festgeschrieben. Damit kann in Abhängigkeit einer gewählten zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit einer Trosse direkt auf die zulässige Schiffskraft geschlossen werden. Diese ist der zentrale Grenzwert bei der Festlegung von Füllstrategien für Schleusen.

Summary

This research project focuses on the mooring of inland waterway vessels in locks. The aim of the project is to develop a method for determining the hawser forces as a function of the ship force. The hawser forces must be limited in order to avoid a failure of the hawsers. In the case of a line failure, the tensile energy will be released abruptly and there is a danger to life due to snapping back line ends. This research project contributes to the necessary revision of the criteria for the ship forces allowed during a lockage.

It is not possible to directly determine the hawser force from the acting ship force, as the hawser force depends on unknown parameters such as length, material and pretension of the hawsers. For this reason, hawser and ship forces are considered in a statistical context. The ratio of hawser force to ship force is expressed by an amplification factor and a corresponding probability of exceedance, which enables the allowable ship forces to be determined directly as a function of a defined risk. For this purpose, the acting hawser forces are first determined using Monte Carlo simulations on the basis of a highly abstracted model. The generated data set is used for the statistical description of the amplification factors. The reliability of the abstraction is verified by a comparison with the results of a 3D CFD model based on the flow solver OpenFOAM®. Furthermore, the CFD model approach is validated by comparison with a physical model of the system.

The final output of this research and development project is the correlation between the probability of a hawser breaking and the so-called amplification factor, which describes the ratio of acting ship force to acting hawser force. The breaking load of the hawsers is defined for the European Union. Consequently, the selected acceptable probability of failure of a hawser allows for the direct calculation of the allowable ship force. This value is the main limiting factor when determining filling strategies for locks.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Ziel	1
1.2	Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)	3
2	Forschungsansatz	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Bisherige Betrachtungen zu zulässigen Schiffskräften	3
2.3	Aktuelle Bemessungskriterien für Bundeswasserstraßen	6
2.4	Forschungsbedarf	6
2.5	Neuer Bemessungsansatz	9
3	Ergebnisse	11
3.1	Stichprobenumfang	11
3.2	Extremwertverteilung	13
3.3	Extrapolation für geringe Auftretenswahrscheinlichkeiten	15
4	Schlussbetrachtungen	16
4.1	Zusammenfassung	16
4.2	Empfehlungen	17
4.2.1	Allgemeines	17
4.2.2	Technische Empfehlungen	17
4.2.3	Strategische Empfehlungen	18
4.2.3.1	Materialparameter der Trossen	18
4.2.3.2	Handlungsanweisungen zum Vertäuungsprozess	18
4.2.3.3	Festlegung von verbindlichen Toleranz- und Akzeptanzschwellen	18
4.3	Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	19
4.3.1	Datenerhebung	19
4.3.2	Beschreibung des Materialverhaltens	19
4.3.3	Erweiterung des abstrahierten Ansatzes um die Interaktion Schiff-Wasserkörper	19
4.4	Ausblick	20
4.4.1	Integration des Verfahrens in einen Fast-Time-Ansatz zur Simulation von Schleusenfüllungen	20
4.4.2	In-situ-Optimierung des Schleusenfüllprozesses	21
4.4.3	Good Navigation Status	22
5	Literaturverzeichnis	23

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1: Schaden an einem Gebäude auf der Planie der Schleuse Brunsbüttel durch umherfliegende Trossenteile	2
Abbildung 2: Wirkende Trossenkraft F_T in Abhängigkeit von der Schiffslängskraft F_S und der Trossenlänge l_T unter Berücksichtigung dynamischer Effekte am Beispiel eines mit einer Stahltrosse vertäuten Europaschiffs nach Partensky (1986)	4
Abbildung 3: Erforderliche Mindestbruchlast der Festmachetrossen nach GL (1976) und CESNI (2023)	7
Abbildung 4: Wirkende Trossenkraft (orange und grün) bei synthetisch aufgebrachtener Schiffskraft (blau)	10
Abbildung 5: Empirische Quantilwerte in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang N . a) Mittelwert μ , b) 99,99 %-Quantil: Die Streuung der Quantilwerte nimmt mit steigendem Stichprobenumfang deutlich zu.	12
Abbildung 6: Empirische Wahrscheinlichkeiten des Verstärkungsfaktors für den Standardfall auf Wahrscheinlichkeitspapier mit inverser logarithmischer Abszisse.	13
Abbildung 7: Empirische Überschreitungswahrscheinlichkeiten (plotting positions) und angepasste Verteilungsfunktionen auf einem Wahrscheinlichkeitsnetz	14
Abbildung 8: Extrapolierte Verstärkungsfaktoren V für Kunststofftrossen in Abhängigkeit der Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}}$	15
Abbildung 9: Systemmodell einer möglichen Kopplung von Schiff und Schleusenammer	20
Abbildung 10: Fast-Time-Software „LoMo“ zur Simulation der Schleusenfüllung	21

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Verteilungsparameter der GEX	14
Tabelle 2: Extrapolierte Verstärkungsfaktoren V für Kunststoff- bzw. Stahltrossen	15

1 Einleitung

Die heute angewandten Kriterien für die hydraulische Bemessung und den Betrieb von Schleusen im Binnen- und Seebereich basieren größtenteils auf jahrzehntealten Erfahrungswerten (z. B. zusammengefasst in Partenscky 1986). Für diese Bemessungskriterien fehlt eine aktuelle wissenschaftliche Basis und die maßgebenden Rahmenbedingungen haben sich geändert. Die Bemessungskriterien der BAW und der an Deutschland angrenzenden Staaten (Niederlande, Belgien, Frankreich) unterscheiden sich trotz grenzüberschreitenden Schiffsverkehrs (s. a. PIANC 2015).

Untersuchungen der Schleusen am Nord-Ostsee-Kanal und am Neckar zeigen, dass durch minimale bauliche Anpassungen oder eine optimierte Füllstrategie auch Schleusen mit stark vereinfachten Füllsystemen sicher und ausreichend schnell betrieben werden können. Oftmals ist jedoch nicht klar, welche der vorliegenden Bemessungskriterien maßgebend sind und in welchen Bewertungskontext diese zueinander zu bringen sind, um den Anforderungen an die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt in ausreichendem Maße gerecht zu werden. Weiterhin bestehen maschinenbauliche, stahlwasserbauliche und steuerungstechnische Zwangsbedingungen, die in diesem Kontext bislang kaum berücksichtigt wurden.

Dieser FuE-Abschlussbericht ist eine Kurzform der Dissertation „Entwicklung eines semi-probabilistischen Bemessungskonzepts zur Optimierung der Füllung einer Binnenschifffahrtsschleuse“ (Belzner, 2024). Weiterführende Informationen zur Forschung können Belzner (2024) entnommen werden.

1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Schleusen haben als Teil der Bundeswasserstraßen eine wichtige verkehrliche Bedeutung. Ihre einwandfreie Funktion ist eine zentrale Voraussetzung für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt. Diese Sicherheit und Leichtigkeit muss zu jedem Zeitpunkt während der Füllung und Entleerung der Schleusenkammer gewährleistet sein, sodass zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr für die Schifffahrt besteht. Gleichzeitig besteht in der Regel die Anforderung, Wartezeiten an Schleusen zu vermeiden und die Kammer möglichst schnell zu füllen.

Eine Aufgabe der Bundesanstalt für Wasserbau ist es, Schleusenfüllsysteme im Hinblick auf die Hydraulik der Füllung zu bewerten und weiter zu optimieren. Dabei werden meist geometrische Anpassungen am Füllsystem vorgenommen und der Öffnungsfahrplan der Füllorgane angepasst. Ziel dieser Optimierung ist es, eine möglichst schnelle Füllung zu ermöglichen, ohne ein definiertes Niveau an zulässigen Schiffskräften zu überschreiten. Die Kammer ist so schnell wie möglich und so langsam wie nötig zu füllen.

Die Bewertung des Kriteriums „Füllzeit“ ergibt sich in der Regel aus der verkehrlichen Beaufschlagung der jeweiligen Schleuse. Die Schiffs kraft ist die aus der Hydraulik des Wassers resultierende Kraft, die während der Füllung auf den Schiffsrumpf wirkt und ist schwieriger zu bewerten. Die Schiffs kraft bewirkt Zugkräfte in den Haltetrossen, welche bei Überschreitung einer maximalen Belastung reißen können.

Die Vertäuung von Schiffen und die damit verbundene Gefahr eines Trossenrisses sind ein großes Risiko für die Besatzung und das Schleusenpersonal. Im Fall eines Trossenrisses wird die

Spannenergie der Trossen schlagartig frei und es besteht die Gefahr, dass Besatzungsmitglieder oder Schleusenpersonal von zurückschnellenden Trossenenden getroffen und verletzt werden.

Am 28. Oktober 2008 kam es beispielsweise an der Seeschleuse Brunsbüttel zu einem tödlichen Unfall, bei dem ein Schleusendeckmann (Festmacher) auf der Planie von einer brechenden Leine getroffen und ins Wasser geschleudert wurde (BSU 2010). Abbildung 1 zeigt einen Schaden an der Fassade eines Gebäudes auf der Planie der Seeschleuse Brunsbüttel, hervorgerufen durch umherfliegende Trossenteile nach einem Trossenriss.



Abbildung 1: Schaden an einem Gebäude auf der Planie der Schleuse Brunsbüttel durch umherfliegende Trossenteile

Der Zusammenhang zwischen Schiffskraft und Zugkraft in den Haltetrossen hängt von einer Vielzahl an Randbedingungen ab und ist nichtlinear. In der Vergangenheit wurde die maximale Schiffskraft mit einer analytischen Worst-Case-Abschätzung für das 85-m-Schiff (Europaschiff) so bestimmt, dass bei einer definierten Schiffskraft eine rund sechsfache Sicherheit gegen Trossenbruch besteht (Partensky 1986). Der Vergleich mit dem europäischen Ausland zeigt jedoch, dass die heutige Bemessung eher konservativ ist und zu sehr auf der sicheren Seite liegen könnte. Darüber hinaus trennen moderne semi-probabilistische Bemessungskonzepte zwischen Einwirkung und Widerstand und erlauben die unabhängige Berücksichtigung von Unsicherheiten auf beiden Seiten.

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist die Entwicklung eines semi-probabilistischen Bemessungskonzepts zur Festlegung der maximal zulässigen Schiffskraft während einer Schleusung unter Berücksichtigung der daraus resultierenden Versagenswahrscheinlichkeit der Trossen. Mit Hilfe dieser Betrachtung kann die Bestimmung der maximal zulässigen Schiffslängskraft zukünftig auf aktueller fachwissenschaftlicher Basis erfolgen.

1.2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Die Überprüfung und die Aktualisierung der hydraulischen Bemessungskriterien für Schleusen führen zu einer fundierten fachwissenschaftlichen Grundlage für künftige Planungen. Die geplante Strategie ermöglicht eine einheitliche Bewertung und Risikoabschätzung, mit deren Hilfe in Zukunft Füllsysteme besser geplant, optimiert und effizienter betrieben werden können. Auch bestehende Bauwerke können überprüft und gegebenenfalls durch Anpassung der Betriebsfahrpläne effizienter betrieben werden. Durch die planmäßige Vermeidung kritischer Systemzustände wird die Zuverlässigkeit und Sicherheit in bestehenden und geplanten Schleusen erhöht.

2 Forschungsansatz

2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die früheren Betrachtungen, auf denen heute gültige Bemessungskriterien basieren, diskutiert. Eine kritische Auseinandersetzung mit diesen Bemessungskriterien unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen zeigt schlussendlich den Forschungsbedarf sowie die Notwendigkeit dieser Arbeit auf. Schließlich wird ein neuer Bemessungsansatz, basierend auf statistischen Betrachtungen zu möglichen Trossenkräften, vorgestellt. Hieraus ergibt sich das semi-probabilistische Konzept der Betrachtung von Überschreitungswahrscheinlichkeiten und Verstärkungsfaktoren.

2.2 Bisherige Betrachtungen zu zulässigen Schiffskräften

Die in älterer Literatur genannte zulässige Trossenkraft ist in der Regel vom Bruttoschiffsgewicht abhängig. Winkel (1923) und Laufer (1931) setzen $1/600$ des Bruttoschiffsgewichts für ein Schiff mit einer Tragfähigkeit von 1000 t als Grenzwert an. Wittmann und Bleines (1949) lassen „ $1/600$ bis $1/750$ der Verdrängung des 1350 t-Kahns“ zu. Nach Wickert (1951) dürfen die Trossenkräfte $1/600$ bis $1/1000$ des Bruttoschiffsgewichts betragen. Die Herkunft dieser Grenzwerte ist in keiner der genannten Quellen belegt.

Vrijer (1977) beschreibt einen Ansatz zur Bestimmung der maximalen Schiffskräfte für Seeschiffe in Schleusen. Dabei wird angenommen, dass das Schiff mit vier Stahl- oder Kunststofftrossen kraftschlüssig an einer Kammerwand festgemacht ist. Die maximal zulässige Schiffskraft ergibt sich in Abhängigkeit vom Trossenmaterial und dem Verhältnis von Vorspannung F_v zu Bruchlast R_s der jeweiligen Trossen. Die ermittelten Schiffslängskräfte wurden unter der Annahme günstiger Bedingungen hinsichtlich der Trossen und Winden bestimmt. Um davon abweichende

Bedingungen zu berücksichtigen, wurden die ermittelten zulässigen Schiffskräfte mit einem Sicherheitsbeiwert von 2/3 multipliziert.

Eine analytische Ermittlung der Trossenkraft in Abhängigkeit von der Schiffslängskraft unter Berücksichtigung dynamischer Effekte und der Annahme einer einzelnen vorgespannten Trosse erfolgt in Partensky (1986) für das 85-m-Schiff (Europaschiff). Die Trossenkraft ist dabei neben der Schiffslängskraft von Länge, Material und Vorspannung der Trossen abhängig. Partensky (1986) trifft ingenieurliche Annahmen für diese Parameter und nennt eine zulässige Wasserspiegelneigung von 0,8 ‰, bei der eine maximale Trossenkraft von 1/600 des Bruttoschiffsgewichts unter Berücksichtigung einer rund sechsfachen Sicherheit nicht überschritten wird. Dieser Ansatz stellt die Basis für die heute in Deutschland genutzten Bemessungskriterien dar und wird im Folgenden näher erläutert:

Partensky (1986) nimmt an, dass ein Schiff in der Schleusenammer an einer händisch vorgespannten Trosse festgemacht ist und unter der Wirkung eines Wasserspiegelgefälles zunächst entgegen der Trosse beschleunigt. Sobald die Trosse vollständig gespannt ist, muss diese die statisch wirkende Schiffskraft und die kinetische Energie des Schiffs in Spannarbeit umsetzen.

Aus der Vorspannkraft, der Masse der Trosse und der Länge der Trosse bestimmt Partensky (1986) die Geschwindigkeit, welche das Schiff unter Einwirkung der Wasserspiegelneigung in dem Moment erreicht hat, in dem die Trosse vollständig spannt. Der Extremwert der Lösungsfunktion liefert die größte Dehnung und kann mit dem Hook'schen Gesetz direkt in die Trossenkraft überführt werden. Partensky (1986) wertet dies am Beispiel eines an Stahltrossen festgemachten Europaschiffs unter dem Ansatz einer typischen Vertäuungssituation aus (Abbildung 2).

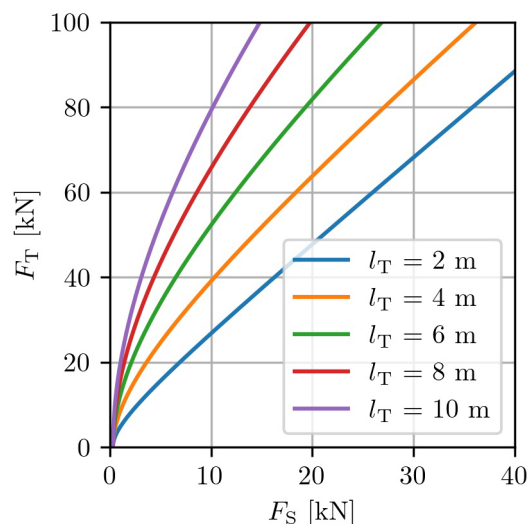


Abbildung 2: Wirkende Trossenkraft F_T in Abhängigkeit von der Schiffslängskraft F_S und der Trossenlänge l_T unter Berücksichtigung dynamischer Effekte am Beispiel eines mit einer Stahltrosse vertäuten Europaschiffs nach Partensky (1986)

Partensky (1986) geht ebenso wie Wickert (1951) davon aus, dass die zulässige Trossenkraft im Allgemeinen 1/600 der Gewichtskraft des Schiffs beträgt. Dehnert (1954) spezifiziert diese Annahme insoweit, dass die erste wirkende Kraftspitze 1/600 der Gewichtskraft des Schiffs nicht

übersteigen soll. Die geforderte Mindestbruchlast der sich an Bord befindlichen Trossen wurde den damaligen Ausrüstungsvorschriften der Germanischen Lloyd (GL 1976) entnommen.

Das Verhältnis von geforderter Bruchlast der Trosse zu zulässiger Trossenkraft wird als Sicherheit definiert. Im Beispiel ergibt sich aus der Bruchlast von 177 kN (GL 1976) und der zulässigen Trossenlast von $1/600$ der Gewichtskraft des Schiffs eine Sicherheit von etwa sechs.

Mit Hilfe von Abbildung 2 kann aus einer wirkenden Schiffslängskraft und einer Trossenlänge die maximal wirkende Trossenkraft abgeleitet werden. Partensky (1986) führt das am Beispiel eines Europaschiffs mit einer 4 m langen Trosse und dem Ansatz der sechsfachen Sicherheit durch. Hieraus folgert Partensky (1986), dass eine Wasserspiegelneigung von 0,4 ‰, bzw. eine Schiffslängskraft von 6,9 kN nicht überschritten werden darf, um das geforderte Sicherheitsniveau beim Europaschiff nicht zu unterschreiten. Damit sei *„auch bei längeren Trossen und geringerer Vorspannkraft noch genügend Sicherheit gegen Bruch der Trossen vorhanden“* (Partensky 1986).

Weiterhin zeigt Partensky (1986), dass Haltetrossen mit einer Länge von 2 m für das Europaschiff eine Wasserspiegelneigung von 0,8 ‰ erlaubten, was nahezu den Niederländischen Vorschriften entspricht, die für den betrachteten Schiffstyp bereits damals eine maximale Wasserspiegelneigung von 1 ‰ zuließen.

Vrijburcht (1994) verfolgt einen ähnlichen Ansatz. Gegenüber Partensky (1986) wird die Systemantwort jedoch numerisch bestimmt, wodurch die Biegeschlaffheit der Trossen (Ausfall auf Druck) berücksichtigt werden kann. Damit tritt die maximale Trossenkraft nicht mehr zwangsläufig beim initialen Aufbringen der Last auf, sondern auch dann, wenn eine anfänglich vorgespannte Trosse aufgrund des Wechsels der Lastrichtung durchhängt und im Anschluss die kinetische Energie des beschleunigten Schiffs aufnimmt. Vrijburcht (1994) führt dabei deterministische Simulationen mit mehreren gewählten Trossenkonfigurationen durch und berücksichtigt Dämpfungs- und virtuelle Masseneffekte, Schwimm- und Nischenpoller sowie das Lockern oder Nachziehen der Trossen während der Schleusenfüllung. Die Eingangsparameter der Simulationen wählt Vrijburcht aufgrund einer Bestandsaufnahme von Beobachtungen an Schleusen in den Niederlanden. Die heutigen Niederländischen Kriterien für die maximal zulässigen Schiffslängskräfte (Rijkswaterstaat 2000) basieren auf Überlegungen von Vrijburcht (1994).

De Mulder et al. (2010) diskutieren am Beispiel der Untersuchung der Schleusen am Hafen von Antwerpen die aktuellen Schiffskraftkriterien für Seeschiffe. Die Autoren merken an, dass numerische 1D- und 2D Programme heute zwar zur Bestimmung der Schiffskraft herangezogen werden, jedoch oft auf den aus der Wasserspiegelneigung resultierenden Teil der Schiffskraft beschränkt sind und andere hydrodynamische Effekte vernachlässigen. Ein Paradigmenwechsel hin zur direkten Bewertung der Wasserspiegelneigung oder alternativ zur Vorgabe einer zulässigen Verschiebung des Schiffs wird angeregt. Die Autoren merken an, *„dass das Problem der zulässigen Schiffskräfte komplex und bisher nicht gelöst ist“* und empfehlen bei weiteren Betrachtungen *„gesunden Menschenverstand und Pragmatismus nicht außer Acht zu lassen“* (De Mulder et al. (2010), übersetzt aus dem Englischen).

Die aktuellen Ansätze für maximal zulässige Schiffslängskräfte werden in PIANC (2015) diskutiert. Das Bemessungskriterium für die hydraulische Auslegung von Schleusen und Schleusenfüllprozessen ist die auf das Schiff einwirkende Kraft, da diese gegenüber der Trossenkraft nicht von der Charakteristik der Vertäuung abhängig ist und damit die Komplexität von Labor- und

numerischen Modellen reduziert wird: „Ein *„Trossenkraftkriterium“* [sei] ein Kriterium zur Bestimmung der hydrodynamischen Schiffskräfte, die zu akzeptablen Trossenkraften führen“ (PIANC (2015), übersetzt aus dem Englischen).

Partenscky (1986) zeigt für ein Europaschiff mit einer Masse von 1766 t und einer mit 0,3 kN vorgespannten Trosse mit 2 m Länge, dass bei einer Wasserspiegelneigung von 0,8 ‰ bzw. einer statisch wirkenden Schiffslängskraft von 13,9 kN die damals erforderliche Bruchlast der Trossen auf einem Europaschiff mit etwa sechsfacher Sicherheit nicht überschritten wird.

2.3 Aktuelle Bemessungskriterien für Bundeswasserstraßen

Bislang wird in Deutschland für ein Großmotorschiff (GMS) mit der Länge von 110 m, der Breite von 11,40 m und einem Tiefgang von 2,80 m eine Kraft von 23,5 kN als maximal zulässige Schiffslängskraft angesetzt. Diese Größe ergibt sich aus den Betrachtungen von Partenscky (1986), Vrijburcht (1994) sowie Überlegungen der BAW (1992, 1996).

In BAW (1992) wird als zulässige Schiffslängskraft $F_{S,max}$ in Abhängigkeit der Gewichtskraft des Schiffs G_S eine „durch den Vergleich zwischen Modellkräften und tatsächlichen Trossenkraften verifizierte“ maximale Schiffslängskraft von

$$F_{S,max} = \frac{G_S}{850 \cdot 1,3} = 0,9 \text{ ‰} \cdot G_S$$

angesetzt. Der Faktor 1,3 berücksichtigt dabei die Neigung der Trosse. Die Herkunft dieses Ansatzes wird nicht weiter erläutert.

In BAW (1996) wird eine nicht zitierte Niederländische Norm genannt, die eine maximale Schiffslängskraft von $F_{S,max} = 0,7 \text{ ‰} \cdot G_S$ zulässt. Aus diesem Wert, den Überlegungen von Partenscky (1986) mit $F_{S,max} = 0,8 \text{ ‰} \cdot G_S$ und BAW (1992) wird schließlich ein Mittelwert gebildet, sodass sich die zulässige Schiffslängskraft für Vorkopffüllsysteme zu:

$$F_{S,max} = 0,8 \text{ ‰} \cdot G_S$$

ergibt. Für ein GMS mit einer Masse von 3000 t entspricht das dem noch heute angesetzten Grenzwert von 23,5 kN für Schleusen jeglicher Füllsysteme.

2.4 Forschungsbedarf

Das System Schiff-an-Trossen ist als dynamisches Feder-Masse-System zu betrachten. Die größten Trossenkraften wirken dann, wenn eine bislang durchhängende Trosse durch ein bewegtes Schiff beansprucht wird und sowohl die wirkende Schiffskraft als auch die kinetische Energie des bewegten Schiffs in Dehnung umgesetzt werden. Die Trossenkraft kann in diesem Fall ein Vielfaches der wirkenden Schiffskraft betragen.

Die Mindestbruchlast R_S der Trossen an Bord eines Binnenschiffs wird in Ausrüstungsrichtlinien geregelt. In der Klassifizierungsvorschrift des Germanischen Lloyds von 1976 (GL 1976) ist die Mindestbruchlast der Trossen festgelegt, auf welche sich Partenscky (1986) bezieht. Diese ergibt sich bei Binnenschiffen in Abhängigkeit der Schiffsmasse in Tonnen (Abbildung 3). Für ein Europaschiff mit einer Masse von 1766 t wird hier eine Mindestbruchlast der Trosse von 179 kN

gefordert (Abbildung 3, blaue Linie). Im Verhältnis zu der in der Literatur immer wieder genannten maximal zulässigen Trossenkraft von 1/600 der Gewichtskraft des Schiffs ergibt sich die beschriebene sechsfache Sicherheit. Für das heute oft als Bemessungsschiff angesetzte Großmotorschiff (GMS) und das übergroße Großmotorschiff (üGMS) ergeben sich nach GL (1976) Bruchlasten von 200 kN bzw. 207 kN. Während die zulässige Trossenkraft linear mit der Masse des Schiffs skaliert, erhöht sich die nach GL (1976) geforderte Bruchlast in diesem Bereich nur sublinear. Den Ansätzen von Partensky (1986) und BAW (1992) folgend, verringert sich damit die Sicherheit mit zunehmender Schiffsmasse auf vier für ein GMS bzw. 3,7 für ein üGMS. Unter Beibehaltung der sechsfachen Sicherheit würden sich geringere zulässige Schiffslängskräfte für ein GMS und ein üGMS ergeben.

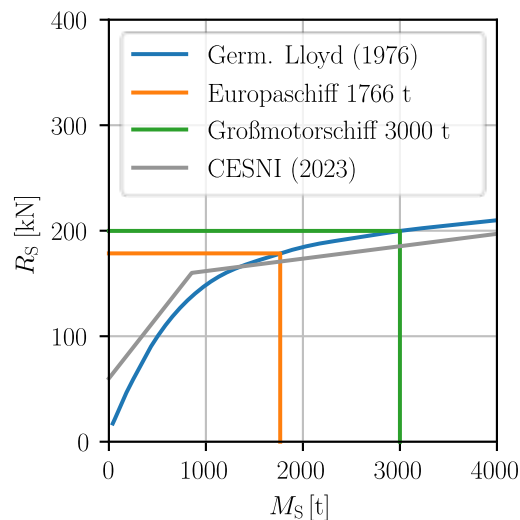


Abbildung 3: Erforderliche Mindestbruchlast der Festmachetrossen nach GL (1976) und CESNI (2023)

Mit der Richtlinie (EU) 2016/1629 der Europäischen Union (EP 2016) wurden harmonisierte Bedingungen für die Erteilung von Schiffszeugnissen für Binnenschiffe auf sämtlichen Binnenwasserstraßen der Europäischen Union geschaffen, welche im ES-TRIN-Standard (CESNI 2023) festgelegt sind. Die darin enthaltene Anforderung an die Bruchlast der Trossen R_S [kN] ist identisch mit anderen Festlegungen, wie z. B. in DNV GL (2015):

$$R_S = \begin{cases} 60 + \frac{L_S \cdot B_S \cdot y_S}{10} & \text{für } L_S \cdot B_S \cdot y_S \leq 1000 \text{ m}^3 \\ 150 + \frac{L_S \cdot B_S \cdot y_S}{100} & \text{für } L_S \cdot B_S \cdot y_S > 1000 \text{ m}^3 \end{cases}$$

mit: L_S, B_S, y_S = Länge, Breite, Tiefgang des Schiffs in [m]

Die im ES-TRIN-Standard genannten Bruchlasten der Trossen sind in Abbildung 3 als graue Linie dargestellt. Im Vergleich mit den früheren Bemessungsvorschriften des Germanischen Lloyd werden für Schiffe mit einer Masse über 1300 t etwas geringere Bruchlasten gefordert.

Die Überlegungen von Partensky (1986) basieren auf der Annahme einer Stahltrosse mit einer Länge von zwei Metern, die mit 0,3 kN vorgespannt ist. Die Herleitung der maximal auftretenden Trossenkraft nach Partensky (1986) beruht auf der Annahme einer plötzlich auftretenden und konstant bleibenden Wasserspiegelneigung. Das Verhalten des Systems Schiff-an-Trossen wird mit der Differentialgleichung eines linear-elastischen ungedämpften Einmassenschwingers beschrieben, welche analytisch gelöst wird, um den Extremwert der Trossendeckung zu bestimmen.

Tatsächlich ist ein Schiff während der Schleusenfüllung mit einer oder mehreren Trossen festgemacht. Während der Füllung können Wasserspiegelgefälle und damit Schiffslängskräfte in zwei Richtungen auftreten. Dabei wird zunächst eine Trosse belastet, während sich der Durchhang der in die Gegenrichtung gespannten Trosse erhöht. Kehrt das Wasserspiegelgefälle in die Gegenrichtung um, ist keine Vorspannung der Trosse mehr vorhanden. Das Schiff beschleunigt zunächst in Richtung des Gefälles, bis die schlaife Trosse gespannt ist und die wirkende Schiffskraft sowie die kinetische Energie des Schiffs in Dehnung umgesetzt wird. Diese Beschleunigung des Schiffs und die wirkende kinetische Energie werden durch die Rückstellkraft der anfänglich vorgespannten Trosse verstärkt. Dieser Fall kann bemessungsrelevant werden, wird in der Überlegung von Partensky (1986) jedoch nur indirekt über die Annahme der sechsfachen Sicherheit berücksichtigt. Eine vollumfängliche Betrachtung des Systems Schiff-an-Trossen erfordert die Modellierung des Schiffs mit mehreren Trossen, welche Zugkräfte aufnehmen können und auf Druck ausfallen. Diese Systeme sind nichtlinear und können mit der Differentialgleichung des linear-elastischen Einmassenschwingers nicht analytisch beschrieben werden.

Die dem Ansatz von Partensky (1986) zugrunde liegenden Annahmen spiegeln einen einzigen individuellen Fall wieder, sodass die Ergebnisse dieser Betrachtung nicht allgemeingültig sind. Ein Europaschiff mit einer zwei Meter langen Stahltrosse, die mit 0,3 kN vorgespannt ist, ist ein Einzelfall und nicht repräsentativ für die heutige Flottenstruktur der Bundeswasserstraßen. Die tatsächlichen Parameter sind zufälliger Natur und nicht deterministisch, beeinflussen die wirkende Trossenkraft jedoch deutlich. Beobachtungen an den Bundeswasserstraßen zeigen beispielsweise, dass Stahltrossen heute kaum noch verwendet werden. Binnenschiffe sind vorwiegend mit Kunststofftrossen ausgestattet, welche eine vergleichsweise große Elastizität haben. Ebenso variiert die Länge der Trossen stark. Binnenschiffe machen in einer Schleusenammer in der Regel so fest, dass die Bugtrosse schiffsseitig auf Höhe eines Schwimmpollers beginnt. Diese Trosse ist dann relativ kurz. Die Länge der Hecktrosse ergibt sich hingegen aus dem Abstand der schiffsseitigen Befestigung zum nächstgelegenen Poller. Diese Trosse kann eher lang sein. Die Vorspannkraft wird von der körperlichen Konstitution eines Besatzungsmitglieds und dem *Human Factor* beeinflusst. Es ist nahezu nicht vorhersagbar, ob und wie stark eine Person einzelne Trossen vorspannt und ob die Trosse während der Schleusenfüllung nachgespannt wird oder nicht.

Der Ansatz von Vrijburcht (1994) berücksichtigt mehrere Trossen, welche nur Zugkräfte aufnehmen und die sich daraus ergebende dynamischen Effekte. Vrijburcht (1994) berücksichtigt zwar eine größere Vielfalt an Eingangsparametern, welche die tatsächlichen Bedingungen an Schleusen

in den Niederlanden abdecken sollen, die Ergebnisse sind jedoch ebenfalls nur für die untersuchten Parametersätze gültig.

Letztendlich basieren die heutigen Grenzwerte für die zulässige Schiffslängskraft auf deterministischen Ansätzen, welche die Bedingungen in den Schleusen nur bedingt repräsentieren. Die Grenzwerte berücksichtigen dabei nicht ein anzustrebendes Sicherheitsniveau, sondern dieses ergibt sich aus dem Vergleich der geforderten Bruchlasten in heute nicht mehr gültigen Klassifizierungsvorschriften mit einer willkürlich erscheinenden Annahme der zulässigen Trossenkraft. Mit größer werdenden Schiffen sinkt das sich ergebende Sicherheitsniveau, obwohl die Gefährdung, welche von sich lösenden Schiffen ausgeht mit deren Größe zunimmt.

Gleichzeitig sind kaum Unfälle durch Trossenbrüche in Schleusen bekannt. Ein Grund hierfür ist sicherlich, dass nur Arbeitsunfälle mit einer Arbeitsunfähigkeit von mehr als drei Tagen erfasst werden und nicht jeder Trossenbruch zwangsläufig zu einem Unfall führt. Defekte Trossen werden möglicherweise beseitigt, ohne dass die aufgetretenen Schäden jemals bekannt werden. Stahltrossen kommen in Schleusen heute kaum noch zum Einsatz und Kunstfasertrossen haben eine deutlich größere Elastizität und Bruchdehnung, sodass das System Schiff-an-Trossen insgesamt weicher wird, wodurch ein geringeres Sicherheitsniveau zum Teil kompensiert wird.

Die heutigen Bemessungskriterien berücksichtigen eine globale Sicherheit gegen Versagen der Trossen, welche sowohl Unsicherheiten in der Bestimmung der maximal auftretenden Trossenkräfte als auch Materialunsicherheiten der Trosse selbst berücksichtigt. Dabei finden unterschiedliche Materialeigenschaften und Herstellungsprozesse verschiedener Trosstypen keine Berücksichtigung. Beispielsweise reagieren Stahl-, Kunststoff- und Hanffasertrossen unterschiedlich auf Alterung, die Anzahl der Lastwechsel, UV-Strahlung, Nässe und Abrieb. An dieser Stelle unterscheiden moderne semi-probabilistische Sicherheitskonzepte zwischen Unsicherheiten auf Einwirkungs- und Unsicherheiten auf Widerstandsseite.

Insgesamt scheinen die heutigen Grenzwerte für die auf Schiffe in einer Schleusenkammer wirkenden Kräfte ein hohes Sicherheitsniveau zu garantieren. Dabei ist jedoch nicht klar, ob oder inwieweit diese zu sehr auf der sicheren Seite liegen. Diese Diskussion zeigt, dass die heutigen Grenzwerte einer objektiven Überprüfung wahrscheinlich nicht standhalten würden.

2.5 Neuer Bemessungsansatz

Ziel dieses FuE-Vorhabens war die Entwicklung eines semi-probabilistischen Bemessungskonzepts zur Festlegung der maximal zulässigen Schiffskraft während einer Schleusung unter Berücksichtigung der daraus resultierenden Versagenwahrscheinlichkeit der Trossen.

Die während einer Schleusung wirkende Schiffskraft F_S kann heute unter Berücksichtigung der hydraulischen und geometrischen Randbedingung mit gegenständlichen und numerischen Modellen mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden. Die Mindestbruchkraft der Trossen R_S ist, in Abhängigkeit vom Schiffstyp, in Klassifizierungs- und Stromvorschriften festgelegt (z. B. CESNI 2023). Die wirkende Trossenkraft entspricht einem Vielfachen der Schiffskraft (Abbildung 4) und ist von der geometrischen Anordnung, dem Material der Trossen sowie der Bewegung des Schiffs abhängig. Das System Schiff-an-Trossen kann dabei vereinfacht als Feder-Masse-System betrachtet werden.

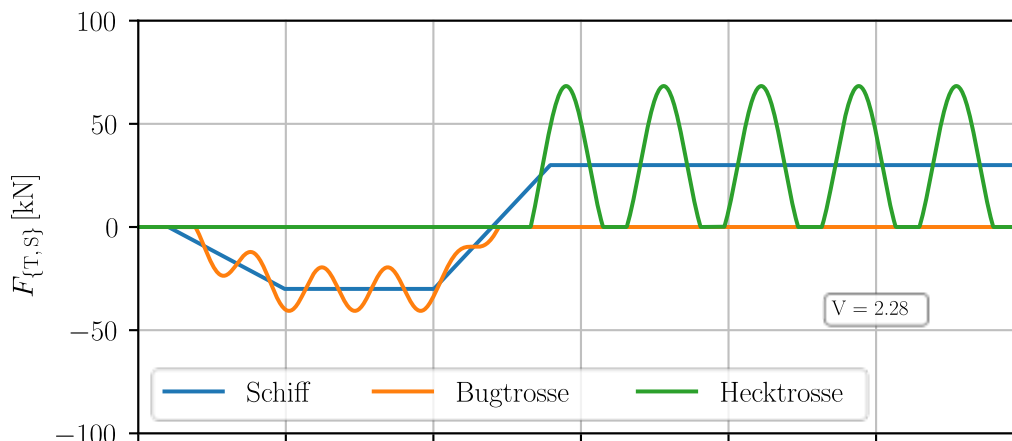


Abbildung 4: Wirkende Trossenkraft (orange und grün) bei synthetisch aufgebrachtter Schiffs-kraft (blau)

Vrijburcht (1994) definiert einen Verstärkungsfaktor V , der das Verhältnis von maximaler Tros- sen- zu maximaler Schiffs-kraft während einer Schleusung beschreibt:

$$V = \frac{F_T}{F_S}$$

mit: F_T = Trossenkraft, F_S = Schiffs-kraft, V = Verstärkungsfaktor

Damit die Trosse nicht versagt, muss damit gelten:

$$V \cdot F_S < R_S$$

Die zu erwartenden Werte für V bestimmt Vrijburcht (1994) mit einem analytischen Modellansatz, der die wirkenden Trossenzugkräfte in Abhängigkeit von der Konfiguration der Vertäuung, der Masse des Schiffs und der wirkenden Last bestimmt. Er führt eine deterministische Variation der Eingangsparameter durch, weist jedoch darauf hin, dass der Wert des Vergrößerungsfaktors von sehr vielen Parametern abhängt und nicht klar ist, ob diese genügend variiert wurden. Eine statistische Bewertung des Verstärkungsfaktors würde umfangreichere Untersuchungen erfordern, sodass die von Vrijburcht (1994) genannten Werte eher auf der sicheren Seite liegen.

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens wurden daher deutlich mehr mögliche Parameterkombinationen abgedeckt. Hierfür wurden Monte-Carlo-Simulationen genutzt, um eine Datenbasis für statistische Aussagen über die zu erwartenden Trossenzugkräfte in Abhängigkeit von der Konfiguration der Vertäuung zu generieren. Diese Methodik erlaubt die Bestimmung des Verstärkungsfaktors mit einer definierten Überschreitungswahrscheinlichkeit und damit letztendlich eine semi-probabilistische Bewertung der maximal zulässigen Schiffs-kraft im Sinne von ISO2394:2015-03.

Das im Rahmen dieses FuE-Vorhabens entwickelte Verfahren wird als semi-probabilistisch bezeichnet. Es basiert auf einem probabilistischen Ansatz zur Bestimmung von Verstärkungsfaktoren in Abhängigkeit von definierten Wahrscheinlichkeiten. Mithilfe dieser Verstärkungsfaktoren kann bei der Bemessung des Füllvorgangs die probabilistische Charakteristik der Vertäuung berücksichtigt werden, ohne dass probabilistische Verfahren direkt angewandt werden müssen.

Um eine statistisch signifikante Aussage zu erzielen, ist eine große Stichprobe erforderlich. Zur Bestimmung der Trossenzugkräfte in Abhängigkeit von den das System beeinflussenden Parametern wird daher ein Modellansatz gewählt, der das System Schiff-an-Trossen stark genug vereinfacht, um kurze Rechenzeiten und damit einen hohen Stichprobenumfang zu erreichen. Gleichzeitig bildet der Modellansatz alle maßgeblichen Prozesse ab, sodass das Verhalten des Systems mit - für die Fragestellung dieser Arbeit - hinreichender Genauigkeit reproduziert wird.

Der gewählte Modellansatz basiert auf der numerischen Lösung der Differentialgleichung des Einmassenschwingers, was eine stark abstrahierte Modellierung der Vorgänge in der Schleusenammer darstellt. Zum Nachweis der Zulässigkeit dieser Vereinfachung wurden ein gegenständliches Modell und darauf aufbauend ein dreidimensionales numerisches Modell auf Basis des Open-Source-Strömungslösers OpenFOAM® genutzt.

3 Ergebnisse

3.1 Stichprobenumfang

Zur Bestimmung der wirkenden Trossenkräfte wurden zunächst mit Python Monte-Carlo-Simulationen mit zufälligen Konfigurationen des Systems Schiff-an-Trosse durchgeführt. Dabei wurden Trossenlänge, -material, -anordnung und die Vorspannung variiert. Der Zusammenhang zwischen Verstärkungsfaktor und der Wahrscheinlichkeit eines Trossenbruchs wird später mittels einer statistischen Beschreibung des Ergebnisdatensatzes bestimmt.

Der Stichprobenumfang entspricht der Anzahl der durchgeführten Simulationen. Dieser muss groß genug sein, um die statistischen Parameter der unbekanntenen Grundgesamtheit mit einem akzeptablen Fehler zu repräsentieren. Die zur Erzeugung der Stichprobe benötigte Rechenzeit skaliert nahezu linear mit der Größe der Stichprobe. Auf einem heute handelsüblichen Computer (Prozessor Intel® Core i5-10210U@1,6 GHz) werden für 10 000 Simulationsläufe knapp drei Sekunden Rechenzeit benötigt. Für eine eventuelle zukünftige Implementierung in bestehende Softwareprodukte zur fast-time-Simulation von Schleusenfüllprozessen, wie beispielsweise LoMo (Belzner et al. 2018), ist die Rechenzeit und damit der Stichprobenumfang möglichst zu begrenzen.

Das Bootstrap-Verfahren (Efron und Tibshirani 1994) ist ein Resampling-Verfahren, bei dem aus einer vorhandenen Stichprobe nacheinander mehrere kleinere Stichproben gezogen werden. Aus diesen wird wiederum ein Merkmal bestimmt. Durch mehrfache Wiederholung dieser Ziehung lässt sich die Schwankungsbreite dieses Merkmals bestimmen, da es sich um mehrere Realisierungen der gleichen Grundgesamtheit handelt (DWA 2012).

In Anlehnung an diese Vorgehensweise wurde zur Bestimmung des für die Simulationen notwendigen Stichprobenumfangs einmalig eine Stichprobe mit dem Umfang $N = 10^8$ erstellt. Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass diese Stichprobe der Grundgesamtheit entspricht. Aus dieser Grundgesamtheit wurden jeweils 1000 Stichproben mit dem Umfang $N = [10^4, 10^5, 10^6, 10^7]$ entnommen. Aus diesen Stichproben wurde dann der Mittelwert μ und der Wert des 99,99 %-Quantils $q_{99,99\%}$ bestimmt, sodass pro untersuchtem Stichprobenumfang eine Menge von 1000 statistischen Werten vorlagen.

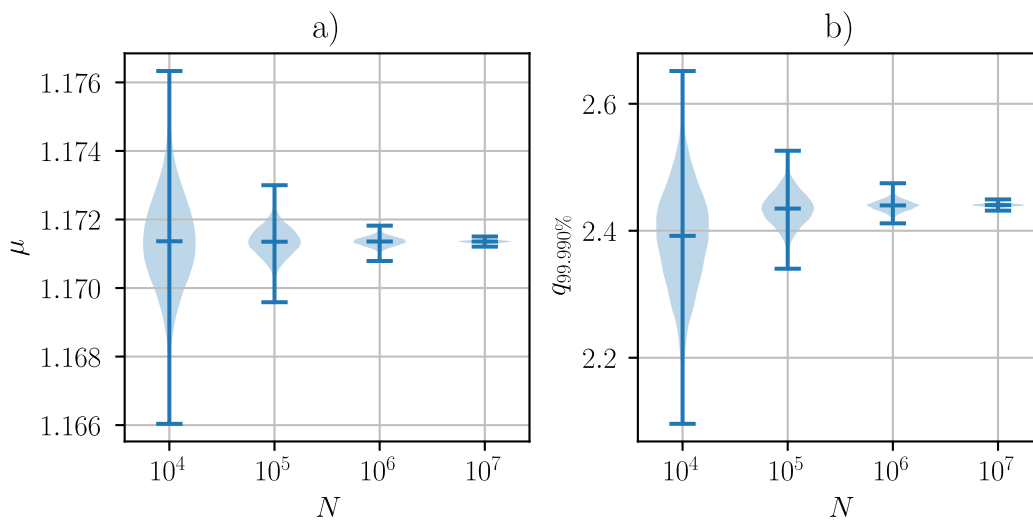


Abbildung 5: Empirische Quantilwerte in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang N .
a) Mittelwert μ ,
b) 99,99 %-Quantil: Die Streuung der Quantilwerte nimmt mit steigendem Stichprobenumfang deutlich zu.

Abbildung 5 zeigt sogenannte Violinen- oder Geigenplots der sich aus den 1000 zufälligen Ziehungen ergebenden Stichproben mit dem Umfang für verschiedene Anzahlen N an Vertäuungssimulationen. Jede Violine zeigt die Dichtefunktion der sich ergebenden Verteilung sowie an den oberen und unteren Enden die Minima und Maxima der betrachteten Größe.

Abbildung 5a) zeigt für unterschiedliche Stichprobenumfänge die Dichtefunktion des Mittelwerts μ , welche sich aus 1000 zufälligen Ziehungen ergibt. Abbildung 5b) zeigt analog dazu die Verteilung des 99,99 %-Quantils $q_{99,99\%}$, eines für die spätere Auswertung genutzten Extremwerts. Die angenommenen wahren Werte ergeben sich aus der angenommenen Grundgesamtheit ($N = 10^8$) zu $\mu = 1,17$ und $q_{99,99\%} = 2,44$.

Der Vergleich der Entwicklung von μ und $q_{99,99\%}$ über die Größe der Stichprobe zeigt, dass der Mittelwert auch bei einem vergleichsweise geringen Stichprobenumfang mit hoher Sicherheit bestimmt werden kann, während sich $q_{99,99\%}$ asymptotisch an den wahren Wert annähert. Ab einer Stichprobe mit dem Umfang von $N=10^5$ ist $q_{99,99\%}$ normalverteilt.

Unter der Annahme, dass $q_{99,99\%}$ für $N \geq 10^5$ normalverteilt ist, können Konfidenzintervalle für $q_{99,99\%}$ anhand der Verteilungsfunktion der Normalverteilung bestimmt werden. Im Intervall $[\mu_{q_{99,99\%}} - 2 \cdot \sigma; \mu_{q_{99,99\%}} + 2 \cdot \sigma]$ befinden sich 95,45 % der Werte der Stichprobe (u. a. Papula 2011).

Für $N = 10^5$ Stichproben liegt $q_{99,99\%}$ demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,73 % zwischen $V = 2,36$ und $2,51$, bzw. der angenommene wahre Wert ($V=2,44$) wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,27 % um mehr als 3,3 % unter- oder 2,9 % überschätzt.

Diese Unsicherheit wurde im Rahmen der Monte-Carlo-Simulationen als akzeptabel erachtet, sodass für die weiteren Betrachtungen jeweils 10^5 Simulationsläufe durchgeführt wurden, was bei der aktuellen Implementierung des Verfahrens einer Rechenzeit von 30 s entspricht.

3.2 Extremwertverteilung

Die aus den einzelnen Simulationsläufen extrahierten Verstärkungsfaktoren V sind als Extremwerte zu interpretieren, da es sich dabei um das jeweils größte innerhalb eines Simulationslaufs auftretende Verhältnis von Trossen- zu Schiffskraft handelt. Die Menge der ermittelten Verstärkungsfaktoren entspricht dem Umfang der vorhandenen Stichprobe. An diese ist eine Verteilungsfunktion anzupassen, welche eine Extrapolation in den Bereich geringer Wahrscheinlichkeiten erlaubt, die u. a. aufgrund des begrenzten Umfangs der Stichprobe empirisch nicht aus dieser bestimmt werden können.

In DWA (2022) wird empfohlen, vor der Anpassung einer Verteilungsfunktion zunächst die empirischen Wahrscheinlichkeiten (*plotting positions*) zu betrachten. Diese können später mit der angepassten Verteilungsfunktion verglichen werden, um die Güte der Anpassung optisch zu bewerten. Hierzu ist die Stichprobe der Größe nach zu sortieren. Jedem Wert der Stichprobe wird eine Überschreitungswahrscheinlichkeit der Form $P_{\bar{u}} = m_R \cdot (N + 1)^{-1}$ zugewiesen, wobei m_R die Rangzahl jedes Wertes der Stichprobe ist. Abbildung 6 zeigt diese Darstellung.

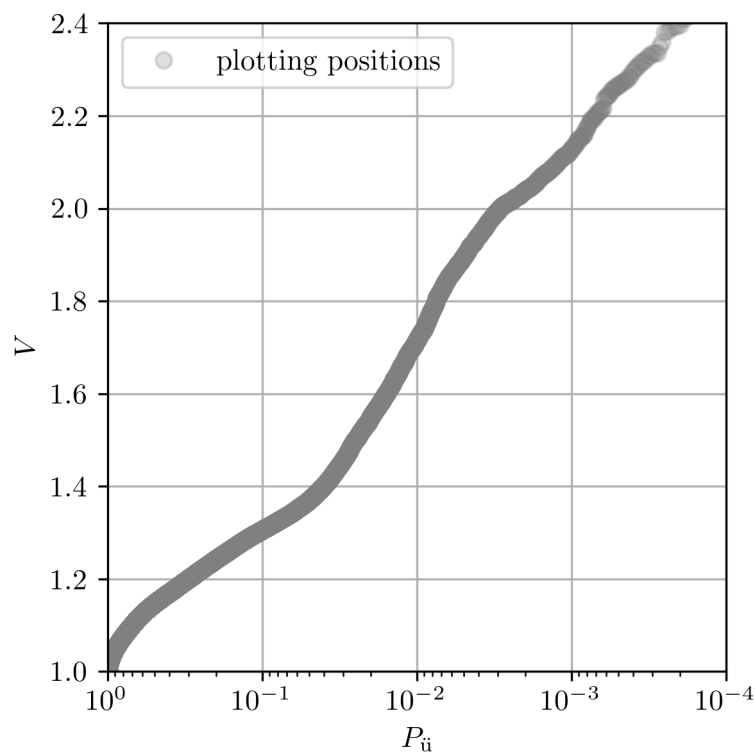


Abbildung 6: Empirische Wahrscheinlichkeiten des Verstärkungsfaktors für den Standardfall auf Wahrscheinlichkeitspapier mit inverser logarithmischer Abszisse.

Klassischerweise wird zunächst eine in ihrer Form grundsätzlich zur Stichprobe passende Verteilungsfunktion gesucht und im Anschluss bestmöglich daran angepasst.

Den Überlegungen von Plate (1993) folgend sind die angepassten Verteilungsfunktionen in Abbildung 7 auf einem Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen. Die Abbildung zeigt die für Überschreitungswahrscheinlichkeiten im Intervall $P_{\bar{u}} = [10^{-4}; 1]$ korrespondierenden Verstärkungsfaktoren der Stichprobe (grau) und die angepasste generalisierte Extremwertverteilung (GEV, siehe

Jenkinson 1955 oder Kotz und Nadarajah 2000) für die gesamte Stichprobe (orange) sowie die für $P_u > 0,99$ angepasste generalisierte Exponentialverteilung (GEX, siehe Ryu 1993) in rot. Zusätzlich sind die Verstärkungsfaktoren dargestellt, die sich aus einer angepassten Log-Normalverteilung ergeben (blau), die augenscheinlich auch eine gute Anpassung an die Stichprobe zeigt, im Extrembereich jedoch Abweichungen ausweist.

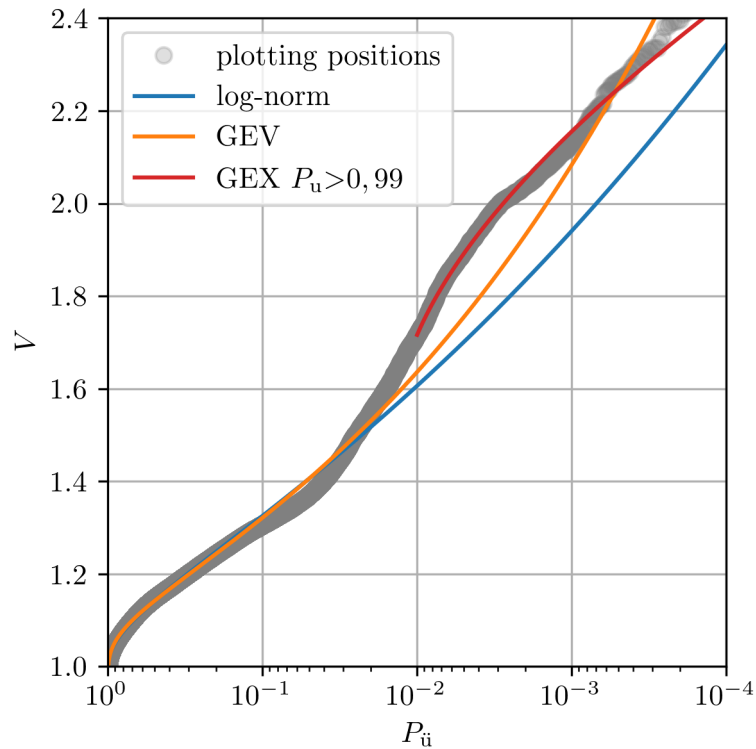


Abbildung 7: Empirische Überschreitungswahrscheinlichkeiten (plotting positions) und angepasste Verteilungsfunktionen auf einem Wahrscheinlichkeitsnetz

Auf weitere statistische Anpassungstests wird an dieser Stelle verzichtet. Einerseits sind einige klassische Tests, wie z. B. der Kolmogorov-Smirnov-Test, für große Stichproben ungeeignet und überschätzen den Einfluss kleinerer Abweichungen (Stephens 1974). Andererseits liefern diese statistischen Tests nur indirekte Hinweise, ob die angepasste Funktion ungeeignet ist, die Daten zu beschreiben. Daher wurde den Empfehlungen von (Plate 1993) gefolgt und die beste Anpassung anhand der grafischen Darstellung ermittelt.

Die Formulierung der Dichtefunktion der GEX ist in Tabelle 1 analog zu Ryu (1993) in normalisierter Form angegeben.

Tabelle 1: Verteilungsparameter der GEX

Fall	a	b	c	d	e
Kunststofftrosse, $P_u > 0,99$	0,50	1,86	0,18	1,72	0,17
Stahltrrosse, $P_u > 0,99$	2,58	1,36	0	3,4	1,04

3.3 Extrapolation für geringe Auftretenswahrscheinlichkeiten

Die Verstärkungsfaktoren für geringe Überschreitungswahrscheinlichkeiten können aus der Stichprobe empirisch nicht ermittelt werden. Einerseits sind diese aufgrund des Stichprobenumfangs zu $P \leq 1 - N^{-1}$ begrenzt, andererseits steigt das Risiko der Verfälschung der Ergebnisse durch Ausreißer. Eine Stichprobe mit dem Umfang $N = 10^4$ ergäbe beispielsweise durch Sortierung den größten innerhalb der Stichprobe auftretenden Verstärkungsfaktor mit der Wahrscheinlichkeit $P = 1 - 10^{-4}$. Ist dieser Wert zufällig ein Ausreißer, würde das Ergebnis verfälscht.

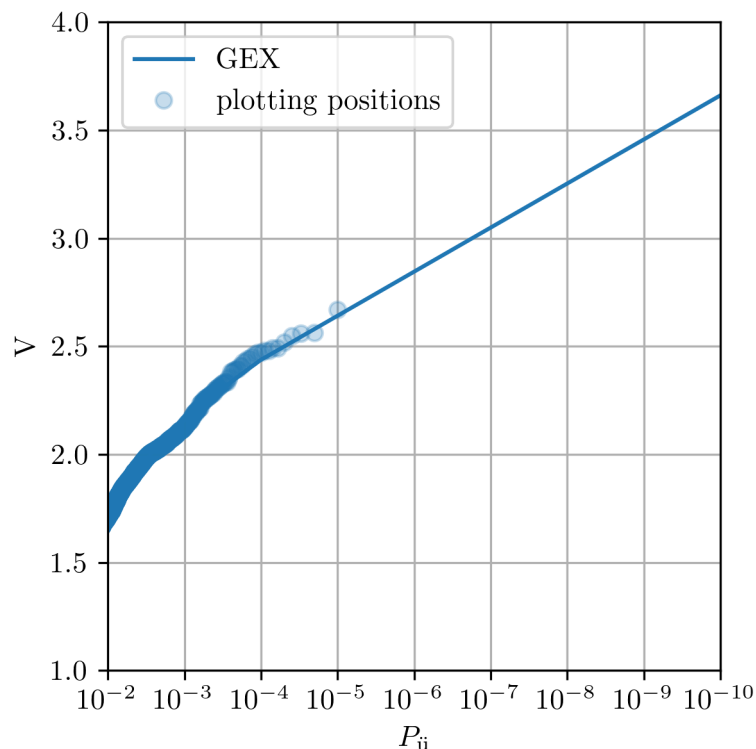


Abbildung 8: Extrapolierte Verstärkungsfaktoren V für Kunststofftrossen in Abhängigkeit der Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$

Die in Kapitel 3.2 an die Stichprobe angepasst GEX hingegen gleicht Ausreißer aus und liefert die Möglichkeit der Extrapolation über die Stichprobe hinaus. Die Umkehrfunktion der GEX liefert die Verstärkungsfaktoren für vorgegebene Wahrscheinlichkeiten.

In Abbildung 8 sind die Verstärkungsfaktoren für die jeweiligen Überschreitungswahrscheinlichkeiten $P_{\ddot{u}} = [10^{-10}; 10^{-2}]$ dargestellt. Die sich für diskrete Überschreitungswahrscheinlichkeiten ergebenden Verstärkungsfaktoren sind zusätzlich in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Extrapolierte Verstärkungsfaktoren V für Kunststoff- bzw. Stahltrossen

Fall	$P_{\ddot{u}} = 10^{-5}$	$P_{\ddot{u}} = 10^{-6}$	$P_{\ddot{u}} = 10^{-7}$	$P_{\ddot{u}} = 10^{-8}$
Kunststofftrosse	2,77	2,89	3,10	3,29
Stahltrosse	6,19	7,12	8,05	8,99

Abbildung 8 bzw. Tabelle 2 liefern den direkten Zusammenhang zwischen dem Verstärkungsfaktor und dem Risiko eines Trossenbruchs und ermöglichen damit bei bekannter Bruchlast der Trosse die Festlegung einer zulässigen Schiffskraft in Abhängigkeit vom gewählten akzeptablen Risiko eines Trossenbruchs.

4 Schlussbetrachtungen

4.1 Zusammenfassung

Während der Schleusenfüllung und -entleerung wirken Kräfte auf die in der Kammer befindlichen Schiffe. Werden diese Kräfte zu groß, können die Trossen reißen und es besteht Gefahr für Leib und Leben der Besatzung und das Schleusenpersonal. Aus diesem Grund sind die wirkenden Schiffskräfte zu begrenzen. Die heute angewandten Grenzwerte für die Schiffskräfte basieren auf deterministischen Überlegungen aus den 1980er Jahren und berücksichtigen aktuelle Schiffsklassen und Trossenmaterialien nicht.

Dieses ingenieurlich orientierte FuE-Vorhaben stellt auf semi-probabilistischer Basis den Zusammenhang zwischen Schiffs- und Trossenkräften her. Die Parameter der Vertäuung wurden als Zufallsgrößen betrachtet und probabilistische Methoden zur Beschreibung der Übertragung von Schiffs- auf Trossenkräfte genutzt. Um eine ausreichende Datenbasis zu erhalten, wurden Monte-Carlo-Simulationen mit einer abstrahierten Modellierung des Systems Schiff-an-Trossen durchgeführt, wobei die Parameter der Vertäuung variiert wurden. Aus jeder Simulation wurde ein sogenannter Verstärkungsfaktor extrahiert, der das Verhältnis von der größten während einer Schleusung auftretenden Trossenkraft zur größten während einer Schleusung auftretenden Schiffskraft beschreibt.

Hierfür wurden an einem gegenständlichen Modell zunächst Versuche durchgeführt, die dem System Schiff-an-Trossen phänomenologisch ähneln. Im Anschluss wurde ein 3D-hydrodynamisch-numerisches Modell desselben Systems erstellt. Dieses wurde durch einen Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen des Labormodells validiert und diente der Beschreibung des allgemeinen Systemverhaltens sowie der Validierung des abstrahierten Ansatzes. Eine Beschreibung beider Modellansätze kann Belzner (2024) entnommen werden.

Die Gesamtheit der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen stellen die Datenbasis für die Anpassung einer Extremwertfunktion dar, die es erlaubt, Verstärkungsfaktoren für geringe Überschreitungswahrscheinlichkeiten zu bestimmen. Damit auf Grundlage des generierten Datensatzes mit ausreichender Genauigkeit auf die Parameter der Grundgesamtheit geschlossen werden kann, sind 10^5 Simulationen notwendig.

Eher selten auftretende Ereignisse finden sich im auslaufenden rechten Ast des Histogramms des Datensatzes wieder. Es wurde gezeigt, dass dieser Ast einem exponentiellen Verlauf folgt und eine 3-parametrische generalisierte Exponentialverteilung an diesen Ast angepasst werden kann. Damit werden Ausreißer geglättet und die Extrapolation in den Bereich geringer auftretender Wahrscheinlichkeiten ermöglicht.

Um die Einflüsse einzelner Parameter auf die Verstärkungsfaktoren und damit die wirkenden Trossenkräfte herauszuarbeiten, wurden die Simulationen und die Anpassung der Verteilungsfunktion mit veränderten Grenzwerten der geschätzten Eingangsgrößen für Stahl- und Kunststofftrossen wiederholt. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Bewegung des Schiffs und damit die kinetische Energie, die in Spannenergie umgesetzt werden muss, möglichst zu begrenzen sind. Eine Vorspannung der Trossen reduziert die freie Bewegungsmöglichkeit des Schiffs während des ersten Kraftstoßes. Die entgegengesetzte Trosse ist nachzuspannen, um ein Durchhängen und damit die freie Bewegungsmöglichkeit zu reduzieren. Ebenso können leichtere Trossen händisch weiter vorgespannt werden.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist es zwar möglich, angestrebten Versagenswahrscheinlichkeiten für Trossenbrüche zulässige Schiffskräfte zuzuordnen, jedoch ist die Einordnung dieser Wahrscheinlichkeiten schwierig, da keine Grenzwerte für zulässige Unfallwahrscheinlichkeiten am Arbeitsplatz oder im Bereich der Binnenschifffahrt bekannt sind.

4.2 Empfehlungen

4.2.1 Allgemeines

Aus den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen resultieren Empfehlungen, welche in *technische Empfehlungen* und *strategische Empfehlungen* zu unterscheiden sind.

Technische Empfehlungen können dabei direkt umgesetzt werden, ohne dass es der Überarbeitung von Richtlinien oder Vorschriften bedarf. Strategische Empfehlungen müssen von Expertengruppen ausgearbeitet werden. Daraus sollten rechtsverbindlichen Vorschriften bezüglich des zu verwendenden Tauwerks, der Vertäuung und anzusetzender Grenzwerte resultieren.

Mit den hier genannten Empfehlungen sollen folgende beiden Ziele erreicht werden:

1. Ein hohes Sicherheitsniveau für Besatzung und Schleusenpersonal basierend auf heutigen Vorschriften.
2. Die Festlegung von während einer Schleusenfüllung oder -entleerung maximal zulässigen Schiffskräften basierend auf probabilistischen Betrachtungen.

4.2.2 Technische Empfehlungen

Die Betrachtung des Einflusses einzelner Parameter sowie des Einflusses der Trossenlänge stützt die Annahme von De Mulder et al. (2010), dass die freie Bewegungsmöglichkeit des Schiffs zu betrachten und gegebenenfalls zu reduzieren ist. Das abrupte Spannen einer Trosse aufgrund der Einwirkung eines beschleunigten Schiffs ist zu vermeiden. Je weniger kinetische Energie in Spannenergie umgesetzt ist, desto geringer sind die wirkenden Trossenkräfte.

Zur Reduktion der freien Schiffsbewegung wird daher empfohlen, einen permanenten Spannungszustand der Trossen anzustreben. Hierfür müssen die Trossen zu Beginn der Schleusung vorgespannt werden. Ebenso müssen Trossen, die während der Schleusung einen Durchhang ausweisen, nachgespannt werden. Die mögliche freie Bewegung des Schiffs ist in der dritten Potenz von der Trossenlänge und in der zweiten Potenz von der Wichte der Trosse pro laufendem Meter abhängig. Je geringer die Trossenlänge und je leichter die Trosse, desto weniger Durchhang weist

die Trosse bei gleicher Vorspannkraft auf. In der Folge wird der Beschleunigungsweg des Schiffs und damit dessen kinetische Energie zum Zeitpunkt der Straffung der Trosse reduziert.

Insgesamt können die technischen Empfehlungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Trossen sind stets unter Spannung zu halten.
- Die Länge der Trossen zwischen den Aufhängepunkten ist zu reduzieren. Die Trosse sollte zwischen zwei Pollern mit möglichst geringem Abstand gelegt werden.
- Kunststofftrossen sind zu bevorzugen.

4.2.3 Strategische Empfehlungen

4.2.3.1 Materialparameter der Trossen

Im ESTRIN-Standard (CESNI 2023) wird lediglich eine Mindestbruchlast für Trossen gefordert. Die Betrachtungen dieses FuE-Vorhabens zeigen jedoch, dass Trossen mit höherer Mindestbruchlast höhere Lasten *anziehen*. Ebenso zeigt sich, dass Stahltrossen aufgrund ihrer höheren Steifigkeit selbst bei exakter Einhaltung der Anforderungen nach CESNI (2023) ebenso höhere Lasten anziehen. Generell könnte der Parameterraum der im Rahmen dieses FuE-Vorhabens getroffenen Annahmen reduziert werden, wenn über die Mindestbruchlast hinausgehende Materialeigenschaften der Trossen gefordert würden. Weiterhin würden sich die Verstärkungsfaktoren und damit die wirkenden Trossenkräfte weiter reduzieren, wenn rechtsverbindlich leichtere und elastischere Trossen gefordert würden.

4.2.3.2 Handlungsanweisungen zum Vertäuungsprozess

Der Vertäuungsprozess wird vom *Human Factor* der Schiffsbesatzung beeinflusst. Der Verstärkungsfaktor wird stark von der Vorspannkraft beeinflusst, da eine größere Vorspannung die Bewegungsmöglichkeit des Schiffs und damit die von der Trosse zu absorbierende kinetische Energie reduziert.

Zur Art der Vertäuung und der mindestens aufzubringenden Vorspannung sind heute keine rechtsverbindlichen Vorschriften bekannt. An dieser Stelle wird daher empfohlen, die in Kapitel 4.2.2 genannten technischen Empfehlungen in rechtsverbindliche Handlungsanweisungen zu überführen.

4.2.3.3 Festlegung von verbindlichen Toleranz- und Akzeptanzschwellen

In Belzner (2024) erfolgt der Versuch der Festlegung der akzeptablen Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Trossenbruchs durch einen Vergleich mit anderen Lebensrisiken sowie der aus dem Ausland bekannten Toleranz- und Akzeptanzschwellen. Hier kann dieses FuE-Vorhaben nur mögliche akzeptable und tolerable Schiffskräfte aufzeigen, da eine Bewertung vor dem Hintergrund von angenommenen Toleranz- und Akzeptanzschwellen erfolgt. Eine rechtsverbindliche Festlegung der am Arbeitsplatz oder im Bereich der Binnenschifffahrt zulässigen Risiken für letale Unfälle ist bislang nicht bekannt. Hier muss ein Expertengremium, idealerweise bestehend aus Vertretern aus Wissenschaft und Praxis, Vorschläge für Zielgrößen von Akzeptanz- und Toleranzschwellen für letale Unfälle am Arbeitsplatz erarbeiten. Eine solche Festlegung sollte auf Basis der Akzeptanz- und Toleranzschwellen (Topping 2001) bzw. der daraus resultierenden

Weiterentwicklung hin zu einem Ampelmodell (Kalberlah et al. 2005) erfolgen und idealerweise auf europäischer Ebene rechtsverbindlich eingeführt werden.

4.3 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

4.3.1 Datenerhebung

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz erlaubt die Bestimmung von Verstärkungsfaktoren in Abhängigkeit von einer festzulegenden Überschreitungswahrscheinlichkeit. Dieser Ansatz wurde gewählt, um den bestehenden Unsicherheiten bezüglich der Parameter der Vertäuung zu begegnen.

In Kapitel 4.2.3 wird die Reduktion dieses Parameterraums durch verbindliche Grenzwerte, bezüglich der Materialeigenschaften der Trossen und der Vorgehensweise bei der Vertäuung, empfohlen. Eine Einschränkung des Parameterraums aufgrund von in Naturbeobachtungen gewonnenen Erkenntnissen ist ebenso möglich. Hierfür müssten, ähnlich zu den in PIANC (2015) genannten Beobachtungen von Rijkswaterstaat, Stichproben von Schiffen auf Bundeswasserstraßen untersucht werden. Zusätzlich wäre ein umfangreiches Monitoring des Vertäuungsprozesses an mehreren Schleusen im Bereich der europäischen Wasserstraßen hilfreich. Wichtig dabei ist, dass der Vertäuungsvorgang selbst nicht durch das Monitoring beeinflusst wird.

4.3.2 Beschreibung des Materialverhaltens

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Trossen wurde im Rahmen dieses FuE-Vorhabens als linear-elastisch angenommen, was etwa dem Verhalten einer vorbelasteten Trosse entspricht. Tatsächlich zeigen Kunststofftrossen ein nicht-lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei erstmaliger Belastung und ein zeitabhängiges Verhalten bei andauernder Belastung. Ghoreishi et al. (2007) und Huang und Cun (2014) zeigen Modelle zur Beschreibung dieses Materialverhaltens. Eine exaktere Beschreibung kann zu präziseren Ergebnissen bezüglich der Schiffsposition und der wirkenden Trossenkräfte innerhalb der Simulationen führen. An dieser Stelle muss allerdings die weiterhin bestehende Unsicherheit bezüglich der Parameter der Vertäuung inklusive der genauen Materialeigenschaften der Trossen berücksichtigt werden. Daher ist zunächst zu prüfen, ob eine exaktere Beschreibung des Materialverhaltens in der Gesamtbetrachtung die statistische Verteilung der Verstärkungsfaktoren überhaupt beeinflusst.

4.3.3 Erweiterung des abstrahierten Ansatzes um die Interaktion Schiff-Wasserkörper

Der für die Vertäuungssimulationen genutzte Modellierungsansatz basiert auf der Modellvorstellung eines Einmassenschwingers. Die vergleichende Betrachtung der Ergebnisse der Vertäuungssimulation mit den Ergebnissen der 3D-hydrodynamisch-numerischen Modellierung in Belzner (2024) zeigt, dass dieser Ansatz für die Bestimmung der Verstärkungsfaktoren eine ausreichende Genauigkeit aufweist. Abweichungen sind im Wesentlichen auf die Vernachlässigung der Dämpfung und die Vernachlässigung der Kopplung von Schiffsbewegung und Wasserkörper zurückzuführen.

Eine solche Kopplung könnte durch die numerische Lösung der eindimensionalen Saint-Venant-Gleichungen für den Wasserkörper in der Schleusenammer realisiert werden. Hierbei besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Berücksichtigung des in der Kammer schwimmenden Schiffs und der Vereinfachung der Gleichungen und des Lösungsalgorithmus, sodass möglichst kurze Berechnungsdauern erreicht werden. Bereits Berechnungsdauern von einer Sekunde pro Simulation führten zu einer akkumulierten Berechnungsdauer für 100 000 Simulationen von etwa 28 Stunden.

Alternativ könnte der bisherige Ansatz der Abstraktion weiterverfolgt werden und der Wasserkörper in der Schleusenammer als weitere Masse betrachtet werden. Die einfachste Form dieser Modellvorstellung ist in Abbildung 9 dargestellt. Dabei ist der Wasserkörper mit einem weiteren Feder- und einem weiteren Dämpfungselement mit dem Schiffskörper gekoppelt. Alternativ käme die Modellierung des Wasserkörpers durch eine endliche Anzahl von, ggf. über weitere Federelemente gekoppelten, Massen sowie die Kopplung von Schiff und Wasserkörper durch komplexere oder mehrere Federelemente in Frage. Dabei ist zu klären, ob durch den Verzicht auf die Lösung der Saint-Venant-Gleichungen und die Abstraktion des Wasserkörpers durch eine Anzahl an diskreten Massen überhaupt eine valide Abbildung des Systemverhaltens erreicht werden kann.

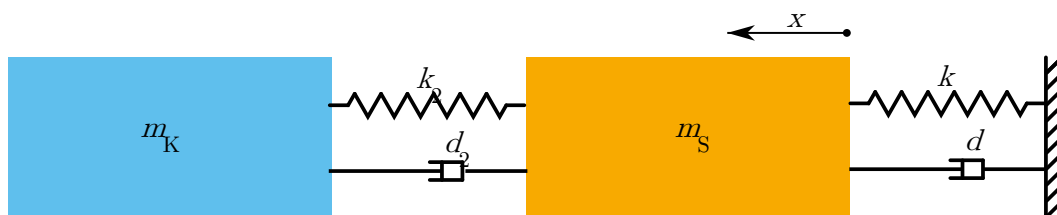


Abbildung 9: Systemmodell einer möglichen Kopplung von Schiff und Schleusenammer

4.4 Ausblick

4.4.1 Integration des Verfahrens in einen Fast-Time-Ansatz zur Simulation von Schleusenfüllungen

Der in Belzner et al. (2018) vorgestellte Ansatz zur Fast-Time-Simulation von Schleusenfüllprozessen (LoMo, Abbildung 10) dient im Wesentlichen der Bestimmung von Schleusenfüllzeiten und Schiffskräften. Der Fokus liegt dabei auf Schleusen, die durch das Oberhaupt gefüllt werden (Vorkopf-Füllung). In diesen sind Strömungen in Kammerlängsrichtung die dominierende Größe. Die Modellierung basiert auf der Lösung der eindimensionalen Saint-Venant-Gleichungen. Die Berechnungsdauer liegt bei etwa 1 s pro Schleusenfüllung.

Ein häufiger Anwendungsfall der Software ist die Optimierung des Ablaufs der Schleusenfüllung, sodass maximal akzeptable Schiffskräfte nicht überschritten werden. Aussagen zu den wirkenden Trossenkräften liefert das Verfahren bislang nicht.

Das Verfahren ist um den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansatz zu erweitern. Damit liefern einzelne Simulationen Informationen zur Überschreitungswahrscheinlichkeit von auftretenden Trossenkräften und das Verfahren kann zur direkten Abschätzung von Trossenkräften bzw. des Sicherheitsniveaus genutzt werden.

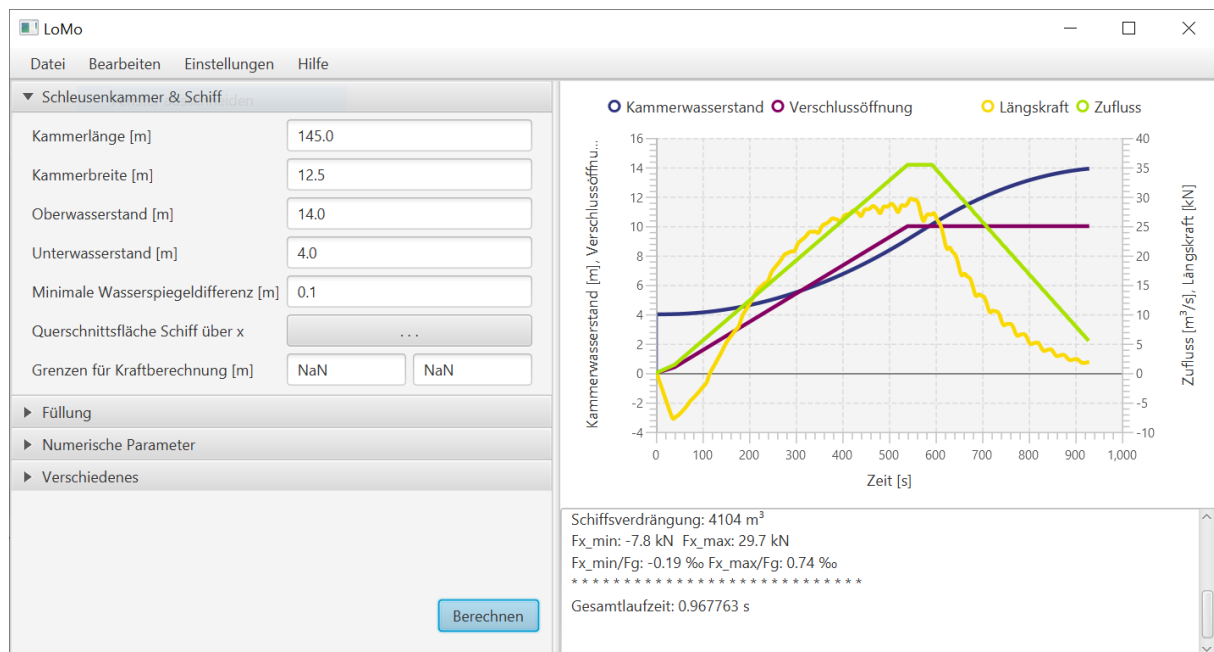


Abbildung 10: Fast-Time-Software „LoMo“ zur Simulation der Schleusenfüllung

4.4.2 In-situ-Optimierung des Schleusenfüllprozesses

Die Optimierung von Schleusenfüllprozessen während der Planungsphase erfolgt stets unter einer *worst-case*-Annahme. Dabei wird davon ausgegangen, dass das größte auf der Wasserstraße zu erwartende Schiff, das sogenannte Bemessungsschiff, mit dem Bug an der vorderen Nutzlängenmarkierung der Kammer liegt. In diesem Zustand sind die größten Schiffskräfte zu erwarten. Eine Betrachtung der wirkenden Trossenkräfte erfolgt heute nicht. Die letztendliche Optimierung der Füllung erfolgt typischer Weise durch eine Anpassung der Fahrgeschwindigkeiten der Füllschütze, dem sogenannten Schützfahrplan.

Tatsächlich sind in Schleusen auch kleinere Schiffe zu erwarten. Sofern die Möglichkeit besteht, machen die Schiffsführenden möglichst weit hinten in der Kammer fest, was meist zu einer ruhigeren Schleusung des Schiffs führt. In dieser Konfiguration sind die zu erwartenden Schiffskräfte kleiner als in der *worst-case* Annahme eines an der vorderen Nutzlängenmarkierung festgemachten Schiffs.

Nach Einfahrt und Vertäuung des Schiffs sind die Abmessungen und die Abladetiefe des Schiffs sowie die Parameter der Vertäuung teilweise keine unbekanntes Größen mehr, sodass sich die Unsicherheiten bei der Bestimmung der zu erwartenden Trossenkräfte verringern. An dieser Stelle kann mit den Parametern der aktuellen Kammerbelegung die zu erwartenden Schiffskraft mit einer Fast-Time-Simulation (z. B. Belzner et al. 2018) bestimmt werden. Darüber hinaus könnte ein Optimierungsverfahren zu diesem Zeitpunkt den Schützfahrplan dahingehend optimieren, dass ein für das jeweilige Schiff definiertes Niveau an Schiffskräften nicht überschritten wird.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode kann dabei genutzt werden, die Schleusenfüllung in situ so zu optimieren, dass statt der festgelegten maximalen Schiffskraft ein akzeptables

Sicherheitsniveau garantiert wird. Der Vorteil einer solchen in-situ-Optimierung wäre eine möglicherweise schnellere Füllung der Schleusen und die damit einhergehende Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Wasserstraße.

4.4.3 Good Navigation Status

Schlussendlich stellen die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen mit zahlreichen anderen Projekten einen der Bausteine zur Erreichung des European Green Deal (KOM 2019) und des daraus resultierenden Ziels des Good Navigation Status dar.

Im Projekt *Abladeoptimierung Mittelrhein* werden die Schifffahrtsverhältnisse am Rhein im Abschnitt zwischen Mainz und St. Goar bei Abflüssen zwischen Niedrigwasser und Mittelwasser an die oberhalb und unterhalb liegenden Streckenabschnitte angepasst (BAW 2022). Damit wird die Befahrbarkeit dieses Abschnitts erhöht und die Verlässlichkeit der Binnenschifffahrt auf dem Rhein insgesamt gestärkt.

Im Projekt *Instandsetzung von Einkammerschleusen unter Betrieb* (Waleczko 2023) werden Möglichkeiten zur Sanierung von Schleusenbauwerken im laufenden Betrieb gesucht. Im Ergebnis müssen Schleusen nicht mehr jahrelang für Baumaßnahmen gesperrt werden, sondern können mit wenigen Stunden Schifffahrtssperre täglich ertüchtigt werden.

Das Projekt *SCIPPPER* (Schleusenassistenzsystem basierend auf PPP und VDES für die Binnenschifffahrt) adressiert die Einfahrt von Binnenschiffen in Schleusen. Ziel ist es, mit Hilfe von Sensordaten eine vollautomatisierte Einfahrt in die Schleusenkammer zu ermöglichen und die Schiffsführenden damit bei diesem schwierigen Manöver zu entlasten.

Im Projekt *FernBIN* wird die ferngesteuerte Fahrt von Binnenschiffen forciert. Dies ist ein Zwischenschritt zur voll autonomen Binnenschifffahrt.

Das *Vessel Train Concept* (u. a. Colling und Hekkenberg 2020) verfolgt die Idee, mehrere Binnen- oder Seeschiffe hintereinander her fahren zu lassen. Dabei ist nur das erste Schiff mit einer vollständigen Besatzung besetzt. Die folgenden Schiffe folgen dann automatisiert dessen Trajektorie. Damit wird dem Fachkräftemangel im Bereich der Binnenschifffahrt begegnet.

Jedes dieser Projekte leistet einen Beitrag zur Erreichung des Good Navigation Status auf deutschen und europäischen Wasserstraßen. Gemeinsam tragen die genannten Projekte dazu bei, die Binnenschifffahrt zu stärken und so viele Güter wie möglich auf der Wasserstraße zu transportieren.

5 Literaturverzeichnis

BAW (Hg.) (1992): Neue Weserschleuse Bremen. Gutachten über den Füll- und Entleerbetrieb an den neuen Schleusen Bremen und die Einrichtungen dazu. Unter Mitarbeit von Lasar. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW Gutachten).

BAW (Hg.) (1996): Neubau Schleuse Spandau. Gutachten über Füllung und Hochwasserabführung der Schleuse Spandau. Unter Mitarbeit von Bürger und Kemnitz. Bundesanstalt für Wasserbau: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW Gutachten).

BAW (Hg.) (2022): Wissenschaftliche Begleitung des Projekts Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW Projektreport). Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108648>.

Belzner, Fabian (2024): Entwicklung eines semi-probabilistischen Bemessungskonzepts zur Optimierung der Füllung einer Binnenschiffahrtsschleuse. Dissertation. Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg. Fakultät für Maschinenbau und Bauingenieurwesen. Online verfügbar unter <https://openhsu.ub.hsu-hh.de/handle/10.24405/15326>, zuletzt geprüft am 05.06.2024.

Belzner, Fabian; Simons, Franz; Thorenz, Carsten (2018): An application-oriented model for lock filling processes. In: *Proceedings of the PIANC-World Congress Panama City, Panama 2018, May 7 to 11*. Online verfügbar unter <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/107576>.

BSU (Hg.) (2010): Pressemitteilung 12/10. Sehr schwerer Seeunfall - Todesfall in der Schleuse Brunsbüttel. Unter Mitarbeit von Jörg Kaufmann. Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung. Hamburg: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung. Online verfügbar unter https://www.bsu-bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2010/presse_12_10.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2023.

CESNI (Hg.) (2023): European standard laying down technical requirements for inland navigation vessels. ES-TRIN. European committee for drawing up standards in the field of inland navigation. Online verfügbar unter https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2022/11/ES-TRIN23_signed_en.pdf, zuletzt geprüft am 11.11.2023.

Colling, A.; Hekkenberg, R. (2020): Waterborne platooning in the short sea shipping sector. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 120, S. 102778. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102778.

De Mulder, T.; Verelst, K.; Vercruyse, J.; De Cock, W.; Haegeman, M. (2010): On Hawser Force Criteria for Navigation Lock Design: Case Study of Maritime Locks in Port of Antwerp. In: PIANC (Hg.): 32nd PIANC International Navigation Congress 2010. Liverpool, United Kingdom, 10 - 14 May 2010. PIANC. Red Hook, NY: Curran.

Dehnert, Hans (1954): Schleusen und Hebewerke. Berlin, Heidelberg: Springer (Handbibliothek für Bauingenieure, Ein Hand- und Nachschlagebuch für Studium und Praxis). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-12946-3>.

DWA (Hg.) (2012): Merkblatt DWA-M 552. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Unter Mitarbeit von Günter Blöschl, Uwe Büttner, Norbert Demuth, Franz-Klemens Holle, Günter

Meon, Ralf Merz et al. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA-Regelwerk, M 552).

DWA (Hg.) (2022): Merkblatt DWA-M 541. Statistische Analyse von Niedrigwasserkenngrößen. Unter Mitarbeit von Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Martin Helms, Alexander Kleinhans, Gregor Laaha, Sabine Schümborg, Jörg Walther und Winfried Willems. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA-Regelwerk, M 541).

Efron, Bradley.; Tibshirani, Robert. (1994): An introduction to the bootstrap. New York: Chapman & Hall (Monographs on statistics and applied probability An introduction to the bootstrap).

EP (Hg.) (2016): Richtlinien zur Festlegung technischer Vorschriften für Binnenschiffe, zur Änderung der Richtlinie 2009/100/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/87/EG. Richtlinie (EU) 2016/1629. Europäisches Parlament: Europäisches Parlament.

Ghoreishi, Seyed Reza; Cartraud, Patrice; Davies, Peter; Messenger, Tanguy (2007): Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A new continuum model for multi-layered fibrous structures. In: *International Journal of Solids and Structures* 44 (9), S. 2924–2942. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.08.033.

GL (Hg.) (1976): Vorschriften für Klassifikation und Bau von stählernen Binnenschiffen. Germanischer Lloyd. Hamurg: Selbstverlag des Germanischen Lloyds.

Huang, Wei; Cun, Hu (2014): Modeling the Stress-Strain Properties of Synthetic Fiber Mooring Lines under Cyclic Loading. In: Jin S. Chung (Hg.): The proceedings of The Twenty Fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE-2014 Busan, Busan, Korea, June 15 - 20, 2014. Cupertino, Calif.: ISOPE, S. 126–133.

ISO 2394:2015-03. Allgemeine Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Bauwerken (2015). Berlin: Beuth.

Jenkinson, A. F. (1955): The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. In: *Q.J Royal Met. Soc.* 81 (348), S. 158–171. DOI: 10.1002/qj.49708134804.

Kalberlah, Fritz; Bloser, Marcus; Wachholz, Carsten (2005): Toleranz- und Akzeptanzschwelle für Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz. Forschung Projekt F 2010. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Online verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Publicationen/Berichte/F2010.html>, zuletzt geprüft am 10.08.2023.

KOM (Hg.) (2019): Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final. Europäische Kommission: Europäische Kommission. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Kotz, Samuel; Nadarajah, Saralees (2000): Extreme value distributions. Theory and applications. London: Imperial College Press.

Laufer, Max (1931): Modellversuche an einer Binnenschiffahrtsschleuse ohne Sparkammern mit großem Gefälle. In: *Zeitschrift für Bauwesen / Zentralblatt der Bauverwaltung* 81 / 51 (3 / 25), 66-76, 365-369.

Papula, Lothar (2011): Gewöhnliche Differentialgleichungen. In: Lothar Papula (Hg.): *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler* Band 2. 13., durchges. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 343–538.

Partenscky, Hans-Werner (1986): *Schleusenanlagen*. Berlin: Springer (Binnenverkehrswasserbau, / Hans-Werner Partenscky ; 2).

PIANC (Hg.) (2015): *PIANC InCom WG 155. Ship Behaviour in Locks and Lock Approaches*. Unter Mitarbeit von Carsten Thorenz, Jeremy R. Augustin, Didier Bousmar, Jean-Pierre Dubbelman, Arcelio Hartley, Peter Hunter et al. PIANC, the World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

Plate, Erich J. (1993): *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. 59 Tabellen. Berlin: Ernst Verl. für Architektur und techn. Wiss.

Rijkswaterstaat (Hg.) (2000): *Design of Locks 1*. Unter Mitarbeit von A. Glerum und A. Vrijburcht (Hydraulic Engineering Reports).

Ryu, Keunkwan (1993): An Extension of Marshall and Olkin's Bivariate Exponential Distribution. In: *Journal of the American Statistical Association* 88 (424), S. 1458. DOI: 10.2307/2291293.

Stephens, M. A. (1974): EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons. In: *Journal of the American Statistical Association* 69 (347), S. 730. DOI: 10.2307/2286009.

Topping, M. (2001): Occupational exposure limits for chemicals. In: *Occupational and environmental medicine* 58 (2), S. 138–144. DOI: 10.1136/oem.58.2.138.

Vrijburcht, A. (1994): Troskrachtcriteria van schutsluizen: Onderzoek. Online verfügbar unter https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_96549_31/, zuletzt geprüft am 02.11.2021.

Vrijer, A. (1977): Criteria for the mooring forces of ocean-going ships in locks. In: *International Association for Hydraulic Research (Hg.): Proceedings of the 17th Congress of the International Association for Hydraulic Research*, Vol. 4, p. 127-134, S. 127–134, zuletzt geprüft am 22.11.2021.

Waleczko, Dominik (2023): *Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems (EUS) für die Auswahl von Verfahren zur Instandsetzung von Einkammerschleusen für die Schifffahrt unter laufendem Betrieb*. Dissertation.

Wickert, Gerhard (1951): *Abhängigkeit und Grösse der Schiffskräfte bei Kammerfüllung durch das Obertor mit tiefliegenderm Drempe*. Ein Beitrag zum Problem der Schiffsschleusung. Dissertation. Technische Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe.

Winkel, R. (1923): Die hydromechanischen Vorgänge beim Schleusen eines Schiffs. In: *Die Bau-technik* (33), S. 324–327.

Wittmann, H.; Bleines, W. (1949): *Hydromechanische Vorgänge bei der Schleusenfüllung*, S. 91–98.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 9726-0

Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81908-0

www.baw.de