

AUSZUG



Abschlussbericht

des Teilvorhabens

CAPTIVMAN

*Verbesserung der Vorhersage des Manövrierverhaltens von Schiffen
auf Basis von virtuellen gefesselten Versuchen*

im Rahmen des BMWi-Verbund-Forschungsvorhabens

PREMAN

*Maßstabeffekte und Umwelteinflüsse bei der Vorhersage des Manö-
vrierverhaltens seegehender Schiffe*

Zuwendungsempfänger:	Technische Universität Berlin
Förderkennzeichen:	03SX324A
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2011 - 30.09.2014
Projektkoordinator / Teilprojektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Andrés Cura Hochbaum
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Lars Koopmann Dipl.-Ing. Johannes Schwarz-Beutel

März 2015

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ---	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbesserung der Vorhersage des Manövrierverhaltens von Schiffen auf der Basis von virtuellen gefesselten Versuchen (CAPTIVMAN)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl.-Ing. Lars Koopmann Dipl.-Ing. Johannes Schwarz-Beutel Prof. Dr.–Ing. Andrés Cura Hochbaum	5. Abschlussdatum des Vorhabens September 2014
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Berlin Fachgebiet Dynamik Maritimer Systeme Sekretariat SG 17 Salzufer 17-19 10587 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution ---
	10. Förderkennzeichen 03SX324A
	11. Seitenzahl 219
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 40
	14. Tabellen 34
	15. Abbildungen 125
16. Zusätzliche Angaben ---	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) ---	
18. Kurzfassung Im Rahmen des Projektes CAPTIVMAN wurden die Maßstabeffekte bei der Manövrierprognose für zwei Schiffstypen, einen Ein- und einen Zweischrauber, eingehend untersucht. Es wurde ein RANS-Verfahren für die numerische Simulation gefesselter Versuche weiterentwickelt. In den virtuellen gefesselten Versuchen wurde die Schwimmlage frei gegeben und es wurde gezeigt, dass dies einen nennenswerten Einfluss auf Seitenkraft und Giermoment haben kann. An der Technischen Universität Berlin wurde ein neues Volumenkraftmodell zur Approximation der Propellerkräfte entwickelt, welches direkt die Schräganströmung berücksichtigt. Das Modell basiert auf der umfangreichen experimentellen und numerischen Analyse schräg angeströmter Propeller. Das mathematische Modell für die Manöverprognose wurde in mehrfacher Hinsicht weiterentwickelt. Mit diesem ist nun die Berücksichtigung von Wind und Wellen bei der Prognose von Rudermanövern möglich. Es wurde insgesamt eine gute, zu Teilen auch sehr gute Übereinstimmung der Prognoseverfahren für das Manövrierverhalten von Schiffen erreicht. Für den Einschrauber konnte eine klare Empfehlung abgeleitet werden, wie Manövrierversuche mit einem Modell durchzuführen sind, um die auftretenden Maßstabeffekte in der Gesamtwirkung zu minimieren. Für den Zweischrauber war keine eindeutige Schlussfolgerung möglich. Es wurden Empfehlungen für die Durchführung von virtuellen gefesselten Versuchen abgeleitet.	
19. Schlagwörter Manövrieren, Maßstabeffekte, RANS, Modellierung, Propellerquerkraft	
20. Verlag ---	21. Preis ---

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN ---	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Improvement of the prediction of manoeuvring behaviour of ships based on virtual captive tests (CAPTIVMAN)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dipl.-Ing. Lars Koopmann Dipl.-Ing. Johannes Schwarz-Beutel Prof. Dr.-Ing. Andrés Cura Hochbaum	5. end of project September 2014
	6. publication date intended
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Berlin Bereich Meerestechnik SG 17 Salzufer 17-19 10587 Berlin	9. originator's report no. ---
	10. reference no. 03SX324A
	11. no. of pages 219
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 40
	14. no. of tables 34
	15. no. of figures 125
16. supplementary notes ---	
17. presented at (title, place, date) ---	
18. abstract Within the framework of the project CAPTIVMAN, scale effects concerning manoeuvring predictions for two ship types, a single screw vessel and a twin screw vessel, have been thoroughly investigated. A RANS method has been further developed for the numerical simulation of captive tests. These tests have been performed with free sinkage and trim. It has been proved, that free sinkage and trim could have a significant influence on the resulting drift force and yaw moment. A new body force model for the approximation of propeller forces has been developed at the Technische Universität Berlin. This new model directly considers oblique inflow to the propeller. The model is based on numerous experiments and numerical analysis of oblique propeller inflow. The mathematical model for manoeuvring predictions has been further developed in several ways. It is now possible to consider the influence of wind and waves for the rudder manoeuvres. In general, a good up to very good agreement of the prediction methods has been achieved. It was possible to derive concrete recommendations of how manoeuvring tests should be performed to minimize scale effects for the single screw vessel. This on the other hand was not possible for the twin screw vessel. Furthermore, recommendations were derived for the procedure of virtual captive tests.	
19. keywords Manoeuvring, scale effects, RANS, modelling, propeller side force	
20. publisher ---	21. price ---

Zusammenfassung

Die klassische Vorgehensweise um die Manövriereigenschaften eines neuen Entwurfs zu bestimmen besteht darin, Manövrierversuche mit einem Modell durchzuführen. Üblicher Weise wird bei der Extrapolation der Ergebnisse auf die Großausführung des Schiffes von der Annahme ausgegangen, dass Effekte, die aus der Nichteinhaltung des Reynolds'schen Ähnlichkeitsgesetzes entstehen (sog. Maßstabeffekte), sich gegenseitig aufheben, und die Versuchsergebnisse werden direkt auf die Großausführung übertragen.

Im Rahmen des Projektes CAPTIVMAN wurden die Maßstabeffekte bei der Manövrieprognose für zwei Schiffstypen, einen Einschrauber und einen Zweischrauber, eingehend untersucht. Es wurde ein RANS-Verfahren für die numerische Simulation gefesselter Versuche weiterentwickelt. In den virtuellen gefesselten Versuchen wurde die Schwimmlage frei gegeben und es wurde gezeigt, dass dies einen nennenswerten Einfluss auf Seitenkraft und Giermoment haben kann. Die virtuellen Versuche wurden auch für die Reynoldszahl der Großausführung durchgeführt, was wertvolle Erkenntnisse für die Klärung der Maßstabeffekte lieferte. An der Technischen Universität Berlin (TUB) wurde ein neues Volumenkraftmodell zur Approximation der Propellerkräfte entwickelt, welches direkt die Schräganströmung berücksichtigt. Das Modell basiert auf der umfangreichen experimentellen und numerischen Analyse schräg angeströmter Propeller. Das mathematische Modell für die Manöverprognose wurde in mehrfacher Hinsicht weiterentwickelt. Mit diesem ist nun die Berücksichtigung von Wind und Wellen bei der Prognose von Rudermanövern möglich.

Zusammen mit dem Projektpartner Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) wurden umfangreiche Modellversuche durchgeführt, deren Ergebnisse einerseits der Validierung der numerischen Verfahren, andererseits zur Untersuchung der Maßstabeffekte und zur Validierung der Manöverprognoseverfahren dienen.

Es wurde insgesamt eine gute, zu Teilen auch sehr gute Übereinstimmung der Prognoseverfahren für das Manövrierverhalten von Schiffen erreicht. Für den Einschrauber konnte eine klare Empfehlung abgeleitet werden, wie Manövrierversuche mit einem Modell durchzuführen sind, um die auftretenden Maßstabeffekte in der Gesamtwirkung zu minimieren. Für den Zweischrauber war keine eindeutige Schlussfolgerung möglich. Es wurden Empfehlungen für die Durchführung von virtuellen gefesselten Versuchen abgeleitet.

Inhalt

I. Darstellung des Teilvorhabens	1
1. Einleitung	2
2. Aufgabenstellung	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4. Wissenschaftlich- technischer Stand	9
II. Darstellung der Ergebnisse	16
1. Mathematische Beschreibung	17
1.1. Koordinatensysteme	17
1.2. Bewegungsgleichungen des Schiffes im hybriden Koordinatensystem	21
1.3. Modellierung der Hydrodynamik und der Umwelteinflüsse	21
2. Darstellung der Testfälle	26
2.1. Einschrauber	26
2.2. Zweischauber	26
3. Beschreibung der durchgeführten Versuche	28
3.1. Ruderkraftmessung	28
3.2. Messung der Propellerquerkräfte	34
3.3. CPMC-A Versuche	42
3.4. Großausführungsmessungen	45
4. Virtuelle gefesselte Manövrierversuche	49
4.1. Theoretische Grundlagen	49
4.2. Berechnungsgitter	56
4.3. Gitterstudien	58
4.4. Volumenkraftmodell zur Approximation der Propellerwirkung	63

4.5. Virtuelle Versuche für die Großausführung	77
4.6. Dynamische Versuche, Einfluss der FO und der Schwimmlage	84
4.7. Stationäre Versuche	95
4.8. Maßstabeffekte in virtuellen gefesselten Versuchen	98
4.9. Einfluss der Propellerseitenkräfte auf das Manövrierverhalten	109
5. Windkräfte	112
5.1. Berechnung der Windkräfte nach Blendermann	112
5.2. Berechnung der Windkräfte mit OPENFOAM	114
5.3. Ergebnisse der Windkraftberechnungen	116
5.4. Modellierung der Windkräfte	117
5.5. Einfluss der Windkräfte während eines Rudermanövers	119
5.6. Zusammenfassung	121
6. Mittlere Wellenkräfte	122
6.1. Berechnung der mittleren Wellenkräfte mit GL-Rankine	122
6.2. Mittlere Wellenkräfte des Einschraubers	123
6.3. Modellierung der mittleren Wellenkräfte	124
6.4. Einfluss der Wellenkräfte während eines Rudermanövers	125
6.5. Zusammenfassung	127
7. Rudermanöver, Vergleich der Prognoseverfahren und Maßstabeffekte	128
7.1. Einschrauber	128
7.2. Zweischauber	134
7.3. Einfluss des Rollens	141
8. Zusammenfassung und Empfehlungen	144
Danksagung	147
Abbildungsverzeichnis	148
Tabellenverzeichnis	154
Abkürzungsverzeichnis	156
Symbolverzeichnis	158
Literatur	163

III. Anhang	166
A. Ergebnisse aus virtuellen Versuchen und anderen RANS-Berechnungen	167
B. Rudermanöver Einschrauber	194
C. Rudermanöver Zweischauber	199
D. Einfluss von Wind und Wellen	206

Teil I.

Darstellung des Teilvorhabens

1. Einleitung

Die klassische Vorgehensweise um die Manövriereigenschaften eines neuen Entwurfs zu bestimmen besteht darin, Manövrierversuche durchzuführen. Hierbei kann es sich um Versuche mit einem frei fahrenden Modell oder um Kraftmessungen bei erzwungenen Bewegungen mit einem gefesselten Modell handeln. Üblicher Weise wird bei der Extrapolation der Ergebnisse auf die Großausführung von der Annahme ausgegangen, dass Effekte, die aus der Nichteinhaltung des Reynolds'schen Ähnlichkeitsgesetzes entstehen (sog. Maßstabeffekte), sich gegenseitig aufheben, und die Versuchsergebnisse werden direkt auf die Großausführung übertragen. Es besteht nach wie vor keine genaue Kenntnis über das Ausmaß der durch die Maßstabeffekte verursachten Fehler.

Die numerische Strömungssimulation stellt eine Alternative und Ergänzung zur versuchs-technischen Untersuchung des Manövrierverhaltens von Schiffen dar, insbesondere da virtuelle gefesselte Versuche (die RANS¹-basierte Simulation der gefesselten Manövrierversuche) die detaillierte Analyse der Umströmung des Schiffes ermöglichen. Um das Potenzial der Manövriervorhersage auf der Basis von RANS-Verfahren voll auszuschöpfen, müssen diese Verfahren weiterentwickelt werden. Darüber hinaus kann die numerische Strömungssimulation für die Klärung von Maßstabeffekten benutzt werden. Dies ist u. a. dadurch möglich, dass diese direkt zur Prognose der Manövriereigenschaften der Großausführung eingesetzt werden kann.

Die TUB konzentrierte sich im Teilvorhaben CAPTIVMAN auf Manövrierprognosen basierend auf einem mathematischen Modell in Verbindung mit hydrodynamischen Koeffizienten. Sämtliche Untersuchungen wurden für einen Einschrauber und einen Zweischrauber durchgeführt, da für beide Propulsionskonzepte unterschiedliche Auswirkungen der Maßstabeffekte erwartet wurden. Aus wissenschaftlicher Sicht stellt die Klärung, wie Manövrierversuche mit gefesselten Modellen durchzuführen sind, um den Maßstabeffekten Rechnung zu tragen, eine bedeutende Neuerung auf internationaler Ebene und eines der wichtigsten Ziele des Vorhabens dar.

¹RANS: Reynolds-averaged Navier–Stokes

2. Aufgabenstellung

Ein Hauptziel des Vorhabens war die Klärung der Maßstabeffekte bei der Vorhersage des Manövrierverhaltens von Schiffen. Es sollte untersucht werden, ob es einen optimalen Propulsionspunkt gibt, für den die Gesamtauswirkung der Maßstabeffekte minimal ist.

Eine Hauptaufgabe der TUB war es, ein RANS-Verfahren für die Durchführung virtueller gefesselter Versuche weiterzuentwickeln. Das Verfahren sollte um die Berücksichtigung der Veränderung der Schwimmlage erweitert und ein neues Volumenkraftmodell zur Approximation der Propellerwirkung entwickelt werden. Da virtuelle gefesselte Versuche eine direkte Prognose für die Großausführung ermöglichen, sollte geklärt werden, ob moderne RANS-Verfahren für die Berechnung der gefesselten Versuche für die Reynoldszahl der Großausführung praktikabel eingesetzt werden können.

Beim Projektpartner HSVA fanden umfangreiche Modellversuche mit einem Ein- und einem Zweischauber statt. Die TUB war an der Planung, Durchführung und Auswertung der gefesselten Modellversuche maßgeblich beteiligt. Zur Validierung der Manövierprognosen waren Großausführungsmessungen vorgesehen, bei denen die TUB ebenfalls eingebunden war. Zur detaillierteren Analyse von Maßstabeffekten waren Ruderkräftmessungen bei verschiedenen Reynoldszahlen vorgesehen.

Es galt, das mathematische Modell so zu erweitern, dass mittels diesem eine Vorhersage des Manövrierverhaltens auf der Grundlage einer komplexeren Modellierung möglich ist. Zugleich sollte das mathematische Modell praktikabel bleiben, weswegen die Anzahl notwendiger Koeffizienten nicht unverhältnismäßig ansteigen durfte.

Im Teilvorhaben der TUB galt es, die resultierenden Propellerkräfte bei Schräganströmung experimentell und numerisch zu untersuchen. Die während eines Rudermanövers auftretenden Propellerquerkräfte sollten für realistische Bedingungen quantifiziert werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Trotz Verzögerungen im Zeitplan konnten alle Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen werden.

Durch Verzögerungen bei den Großausführungsmessungen beider Schiffe ergaben sich Verschiebungen im ursprünglich vorgesehenen Zeitplan. Zeitweilig bestand die Frage, ob der zur Verfügung gestellte Zweischauber seine Klasse behält. Die Großausführungsmessungen mit dem Einschrauber fanden erst Anfang 2014 statt, da zuvor kein geeignetes Schiff gefunden werden konnte, für welches auch die Schiffslinien zur Verfügung standen. Da die Modellversuche erst im Anschluss an die Großausführung (GA)-Messungen durchgeführt werden sollten, resultierten entsprechende Verschiebungen der Modellversuche. Darüber hinaus nahm die Entwicklung des neuen Volumenkraftmodells (**AP3**) zur Approximation der Propellerwirkung mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant.

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Gesamtprojektes unterteilen sich in elf Arbeitspakete. Die TUB ist abgesehen von **AP6** an allen Arbeitspaketen des Verbundvorhabens beteiligt. In Tabelle 3.1 sind die Arbeitspakete aufgelistet. Im Folgenden sind die durchgeführten Arbeiten nach Halbjahren aufgeführt.

Tab. 3.1.: Arbeitspakete der TUB

AP1	Neuartige Modellversuche mit freiem Modell
AP2	Modellversuche mit gefesseltem Modell
AP3	Entwicklung eines neuen Volumenkraftmodells
AP4	Implementierung der Maschinencharakteristik
AP5	Weiterentwicklung der RANS-Verfahren zur Bewegungs- und Strömungssimulation für Manövrieren
AP7	Manövierversimulation für Modell und Großausführung auf der Basis von virtuellen gefesselten Versuchen
AP8	Modellversuche im K27
AP9	Großausführungsversuche mit beiden Schiffen
AP10	Validierung der Manöviervorhersagemethoden
AP11	Ausarbeitung von Empfehlungen

2. Halbjahr 2011 (Oktober bis Dezember)

- Es wurden geeignete Schiffe für die GA-Messungen (**AP9**) gesucht und der Zweischrauber konnte festgelegt werden.
- Voruntersuchungen zur Messung von Ruderkräften am Umlauf- und Kavitationstank K27 (K27) (**AP8**), wobei die Entwicklung einer neuen Ruderhalterung zur Befestigung des Ruders an der Kraftmesswage bei großen Ruderkräften im Vordergrund stand.
- Durchführung verschiedener Tests mit dem in **AP5** weiterzuentwickelnden RANS-Verfahren. Für die Durchführung der virtuellen Versuche wurde das Software-Paket Open Field Operation And Manipulation (OPENFOAM) gewählt.
- Es wurden erste Überlegungen zu den nötigen Ergänzungen des mathematischen Modells und zur Erstellung des für die Manövriersimulationen notwendigen Koeffizientensatzes unternommen (**AP7**).

1. Halbjahr 2012

- Planung der GA-Messungen (**AP9**) für den Zweischrauber.
- Konzeptionelle Entwicklung des neuen Volumenkraftmodells zur Approximation der Propellerwirkung (**AP3**).
- Testung, Anpassungen und Weiterentwicklungen des Software-Paketes OPENFOAM (**AP5**). Zur Untersuchung der numerischen Einstellungen wurden stationäre Driftversuche für einen anderen Einschrauber, für den Vergleichsdaten vorliegen, berechnet. Es wurde ein Einphasen-Solver um die Berücksichtigung von Inertialkräften in der Impulsgleichung des Fluids erweitert und es wurden geeignete dynamische Randbedingungen implementiert. Hierdurch können virtuelle instationäre Versuche auf schiffsfesten Gittern durchgeführt werden.
- Konstruktion einer neuen Welle für das Propellerfreifahrdynamometer zur Aufnahme von Propellern mit kleiner Nabenbohrung (**AP8**).
- Begutachtung des Zweischraubers während eines Werftaufenthaltes.

2. Halbjahr 2012

- Unterstützung bei der Durchführung der ersten Serie von Versuchen mit frei fahrendem Modell des Zweischraubers (**AP1**).
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der ersten Serie gefesselter Versuche mit dem Zweischrauber (**AP2**).

- Die für das Volumenkraftmodell (**AP3**) erforderlichen Propellerkräfte sollten ursprünglich vom Projektpartner Universität Duisburg-Essen (UDE) bereitgestellt werden. Wegen Problemen mit der hierfür vorgesehenen Software wurden an der TUB Voruntersuchungen zur Berechnung drehender Propeller mit OPENFOAM gestartet. Hierfür wurde der Propeller des Benchmark-Schiffes KVLCC2 verwendet. Es wurde ein Verfahren entwickelt, um die berechneten Kräfte auf den Flügeln des drehenden Propellers in eine Datenbank für das Volumenkraftmodell zu transformieren.
- Ergänzung eines Zweiphasen-Solvers um die Berücksichtigung von Inertialkräften. Zur Untersuchung der Gitterabhängigkeit sowie des Einflusses der Diskretisierungs- und Solver-Einstellungen wurden erste exemplarische Versuche mit gefesseltem Modell des Zweischraubers mit und ohne Freie Wasseroberfläche (FO) numerisch simuliert (**AP5**).
- Voruntersuchungen am schräg angeströmten Propeller des KVLCC2 zur Entwicklung einer geeigneten Prozedur zur Korrektur der Messwerte und zum Einflusses der Tauchtiefe des Propellers (**AP8**).
- Unterstützung bei der Planung, Vorbereitung und Durchführung der GA-Messungen mit dem Zweischrauber (**AP9**). Die Versuche fanden im September 2012 statt.

1. Halbjahr 2013

- Unterstützung bei der Durchführung der zweiten und dritten Serie von Versuchen mit frei fahrendem Modell des Zweischraubers (**AP1**).
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der zweiten Serie gefesselter Versuche mit dem Zweischrauber (**AP2**).
- Entwicklung des Volumenkraftmodells zur Kopplung der Propellerkräftedatenbank mit OPENFOAM (**AP3**).
- Umstieg vom freien Gittererzeuger SNAPPYHEXMESH zum Gittererzeuger HEXPRESS der Firma NUMECA, da mit dem vormals gewählten Programm keine zufriedenstellenden Gitter erzeugt werden konnten. Erstellung von Berechnungsgittern für den Zweischrauber mit HEXPRESS (**AP5** und **AP7**).
- Testung der Verfahren zur Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten sowie des zu verwendenden mathematischen Ansatzes für die Manöversimulation (**AP7**).
- Simulation von Rudermanövern des Zweischraubers basierend auf einem Koeffizientensatz, der zum Teil aus virtuellen gefesselten Versuchen bestimmt wurde (**AP7**).
- Weiterentwicklung der Prozedur zur Korrektur der Messwerte aus Messungen von schräg angeströmten Propellern im K27 (**AP8**).

- Vorbereitungen zur Messung von Ruderkräften im K27 (**AP8**). Hierfür wurde die Versuchsanlage von der kleinen auf die große Messstrecke umgebaut.

2. Halbjahr 2013

- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der dritten Serie gefesselter Versuche mit dem Zweischrauber (**AP2**).
- Abschluss der Entwicklung des Volumenkraftmodells zur Kopplung der Propellerkräfte datenbank mit OPENFOAM. Dieses wurde in verschiedenen Solvern implementiert und für homogene Anströmung getestet (**AP3**). Die für die Erstellung der Datenbank erforderlichen RANS-Berechnungen des homogen aber schräg angeströmten Propellers wurden für den Propeller des Zweischraubers abgeschlossen.
- Detailuntersuchungen zu den Ruderkräften des Zweischraubers in den virtuellen gefesselten Versuchen mit gelegtem Ruder (**AP5** und **AP7**).
- Simulation von Standard-Versuchen für den Zweischrauber basierend auf den Koeffizienten aus den Versuchen mit gefesseltem Modell. Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche mit frei fahrendem Modell (**AP10**).
- Abschluss der Voruntersuchungen zu den Messungen schräg angeströmter Propeller im K27 (**AP8**). Erweiterung des Bereichs der Schräganströmung auf $\delta = 25^\circ$.

1. Halbjahr 2014

- Unterstützung bei der Durchführung der GA-Messungen mit dem Einschrauber (**AP9**). Die Versuche fanden im Januar 2014 statt.
- Unterstützung bei der Durchführung der Versuche mit frei fahrendem Modell des Einschraubers (**AP1**).
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von zwei Serien gefesselter Versuche mit dem Einschrauber (**AP2**).
- RANS-Berechnungen des Propellers des Einschraubers (**AP3**). Testung des Volumenkraftmodells für beide Schiffe (inhomogene Anströmung).
- Untersuchungen zum dimensionslosen Wandabstand bei Modell- und GA-typischen Reynoldszahlen (**AP5**).
- Entwicklung einer Vorgehensweise, um in den dynamischen virtuellen gefesselten Versuchen die Schwimmlage frei zu geben (**AP5**).
- Durchführung der virtuellen Versuche für den Zweischrauber (**AP7**).
- RANS-Berechnungen zur Bestimmung von Windkräften für den Einschrauber (**AP7**).
- Berechnung der mittleren Kräfte im Seegang für den Einschrauber (**AP8**).

- Fertigstellung eines Unterbaus für das Propellerfreifahrdynamometer am K27. Hierdurch wurde der maximale Winkel der Schrägstellung auf 25° erhöht.
- Abschluss der Messungen des schräg angeströmten Propellers beider Schiffe (**AP8**).
- Abschluss der Ruderkraftmessungen für drei Maßstäbe des Ruders des Zweischraubers (**AP8**).

2. Halbjahr 2014

- Abschluss der virtuellen gefesselten Versuche für den Einschrauber (**AP7**).
- Bestimmung der Koeffizientensätze aus den virtuellen gefesselten Versuchen (**AP7**).
- Simulation von Standard-Manövern für Modell und GA basierend auf den virtuellen gefesselten Versuchen (**AP7** und **AP10**).
- Validierung der Manövervorhersagemethoden (**AP10**).
- Ausarbeitung von Empfehlungen (**AP11**).

4. Wissenschaftlich- technischer Stand

Maßstabseffekte: Eine ausführliche Darstellung des wissenschaftlichen und technischen Standes zum Thema Maßstabseffekte ist in (The Manoeuvring Committee of 26th ITTC, 2011) zu finden. In (Manoeuvring Committee of 27th ITTC, 2014) wurde dieser entsprechend aktualisiert. Seit Beantragung des Forschungsvorhabens PREMAN wurden international wenige neue Ergebnisse zum Thema Maßstabseffekte veröffentlicht.

Zwischen Modellversuchsergebnissen und Großausführungsmessungen können Differenzen im Manövrierverhalten auftreten. Martin, 1975 analysierte Drehkreisversuche von 14 Schiffen und Modellen und stellte zum Teil große Unterschiede fest. Die Ursache dieser Differenzen wird in den Maßstabseffekten vermutet. Maßstabseffekte zwischen Modell und Großausführung ergeben sich aus einer nicht zu vermeidenden Verletzung der Reynoldsähnlichkeit in Manövrier-Modellversuchen. Bislang ist nicht geklärt, welche Auswirkungen Maßstabseffekte bei der Manövrieprognose besitzen.

Der wichtigste Maßstabseffekt beim Manövrieren ergibt sich aus der unterschiedlichen Ruderanströmung für Modell und Großausführung. Im Modellmaßstab sind die Reynoldszahlen gegenüber der Großausführung um ca. zwei Größenordnungen kleiner. Daher sind sowohl Grenzschicht als auch Ablösungserscheinungen überzeichnet. Hieraus folgt eine kleinere Anströmgeschwindigkeit des Ruders und damit einhergehend eine geringere Ruderwirksamkeit im Modellversuch. Der zweite wesentliche Maßstabseffekt folgt aus dem im Verhältnis größeren Zähigkeitswiderstand des Modells gegenüber der Großausführung. Dem höheren Zähigkeitswiderstandsbeiwert wird in der Regel im Manövrierversuch, im Gegensatz zum Propulsionsversuch, nicht Rechnung getragen. Ein sogenannter Reibungsabzug in Form einer Zugkraft, die dem frei fahrenden, selbst-angetriebenen Modell hilft, wird nicht angebracht. Hieraus resultiert eine Überbelastung des Propellers, wodurch es zu einer größeren Anströmung des Ruders kommt, sofern sich dieses im Propellerstrahl befindet. Die Ruderwirksamkeit wird dadurch im Modellversuch künstlich erhöht. Beide Effekte wirken entgegengesetzt. Für Einschrauber besteht die Chance, dass sich beide Effekte ausgleichen. Für Zweischrauber ist dies weniger der Fall, da die Ruder weiter aus dem Nachstromfeld des Rumpfes herausrücken und von einer Überzeichnung der

Grenzschicht weniger betroffen sind. Dies würde im Modellversuch zu einem besseren Manövrierverhalten führen als in der Großausführung.

Sowohl die Ruderkräfte als auch die Seitenkraft des Rumpfes sind von der Reynoldszahl beeinflusst. Für dünne Profile, wie sie beispielsweise an Rudern von Schiffen zu finden sind, wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass der Auftriebsbeiwert nur vom Anstellwinkel abhängt, jedoch nicht von der Reynoldszahl. Nach Abbott und Von Doenhoff, 1959 hat die Reynoldszahl erst bei großen Anstellwinkeln, und zwar dann wenn Strömungsablösung eintritt, einen Einfluss auf die Auftriebscharakteristik. Andere Quellen wiederum zeigen, dass es sehr wohl einen geringen Einfluss der Reynoldszahl auf die Steigung des Auftriebsbeiwertes gibt, vgl. (Whicker und Fehlner, 1958). Nach The Manoeuvring Committee of 26th ITTC, 2011 kann davon ausgegangen werden, dass eventuelle Effekte der Reynoldszahl auf die Steigung der Ruderseitenkraft für das Ruder hinter einem Propeller reduziert werden, da die Zuströmung zum Ruder stark turbulent ist.

Shen u. a., 2010 stellten für einen Zweischauber fest, dass der Drehkreis in der GA kleiner als im Modellmaßstab¹ ist, was mit der oben dargestellten Erwartung im Widerspruch steht. Als wesentliche Ursachen nennen Shen u. a., 2010, dass die Ruderseitenkraft mit der Reynoldszahl steigt und zugleich der Strömungsabriss später eintritt. Shen u. a., 2010 stellten darüber hinaus fest, dass die Maßstabeffekte sich mit einer größeren oder kleineren Ausgangsgeschwindigkeit ganz unterschiedlich entwickeln.

Der Unterwasserbereich des Rumpfes eines Schiffes wirkt bei einer Schräganströmung wie ein angeströmtes Profil. In der Literatur sind teils gegensätzliche Aussagen zum Einfluss der Reynoldszahl auf die Rumpfkkräfte zu finden, vgl. (The Manoeuvring Committee of 26th ITTC, 2011). Kim u. a., 2003 zeigten anhand von RANS-Berechnungen für das Modell und die GA eines Zweischaubers, dass die Seitenkraft in der GA bei größeren Driftwinkeln kleiner ist als für den Modellmaßstab. Nikolaev und Lebedeva, 1980 führten dagegen bereits vor 35 Jahren Geosim-Verusche aus, das größte Modell besaß eine Länge von 30 m. Im untersuchten Reynoldszahlbereich konnten damals keine signifikanten Maßstabeffekte auf die Rumpfkkräfte festgestellt werden.

Darüber hinaus können weitere Maßstabeffekte auftreten. Aus der im Modell höheren Schubbelastung des Propellers kann beispielsweise eine Veränderung der Begradigung der Ruderanströmung resultieren. Im Gegensatz zum Modellversuch kann in der Großausführung am Ruder Kavitation auftreten, was die Ruderwirksamkeit verringert (Shen u. a., 2010).

¹In (The Manoeuvring Committee of 26th ITTC, 2011) wurde fälschlicher Weise dargestellt, Shen u. a., 2010 hätten festgestellt, dass der Drehkreis für die GA größer sei.

2009 wurde an der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam das Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben MANUV (Maßstabeffekte bei der Bestimmung des Manövrierverhaltens von Unterwasserfahrzeugen durch Modellversuche) abgeschlossen (Steinwand, 2009). Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass Maßstabeffekte signifikant sind und in der Manöverprognose berücksichtigt werden müssen. Die durchgeführten Untersuchungen beschränken sich allerdings auf Unterwasserfahrzeuge. Weiterhin ungeklärt bleibt damit der Einfluss der Maßstabeffekte bei der Manöverprognose für nicht tief getauchte Schiffe. Abgesehen von diesem Vorhaben liegen die letzten nationalen Anstrengungen zur Untersuchung der Maßstabeffekte beim Manövrieren bereits über 20 Jahre zurück. Die bekannten Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf die exemplarische Untersuchung der Auswirkung der Maßstabeffekte. Oltmann, Sharma und Wolff, 1980 realisierten unterschiedliche Propulsionspunkte in frei fahrenden Manövrierversuchen zunächst für das Modell eines Mehrzweckfrachters und später für das Modell des Tankers ESSO OSAKA, (Oltmann u. a., 1986). Im Rahmen eines BMFT-Forschungsvorhabens wurden die Maßstabeffekte bei der Manöviervorhersage für das Containerschiff STUTTGART EXPRESS untersucht (Oltmann und Wolff, 1990). Die Ergebnisse dieser exemplarischen Untersuchungen erlauben allerdings keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen darüber, wie sich Maßstabeffekte in der Gesamtheit auswirken, wie Manöviermodellversuche durchzuführen sind, um den Gesamteinfluss der Maßstabeffekte zu minimieren, noch sind die einzelnen Beiträge quantifizierbar.

Wahl des Propulsionspunktes in Manövrierversuchen mit frei fahrendem oder gefesseltem Modell: In Versuchen mit einem frei fahrenden Modell einen anderen Propulsionspunkt als den Modell-Selbstpropulsionspunkt zu realisieren, ist schwierig, da die Entlastungskraft an die aktuelle Geschwindigkeit des Schiffes anzupassen ist. In den oben angesprochenen Versuchen von Oltmann, Sharma und Wolff, 1980 wurde die Entlastungskraft konstant gehalten. Tsukada u. a., 2013 entwickelten eine Einrichtung zur Entlastung des Propellers, bei der die Entlastungskraft über einen Ventilator erzeugt wird, wobei der Schub entsprechend der aktuellen Geschwindigkeit eingestellt werden kann. Diese Lösung ist sicherlich nicht optimal, da die Entlastungskraft nicht auf Höhe des Propellers eingebracht wird. Zudem kann die entstehende Luftströmung zu ungewollten aerodynamischen Kräften am Rumpf führen.

Gefesselte Modellversuche erlauben eine beliebige Wahl des Propulsionspunktes. Durch eine geschickte Wahl des Propulsionspunktes könnten die oben angesprochenen Maßstabeffekte bereits berücksichtigt werden und eine Minimierung der Summe der Einzeleffekte

ermöglicht werden. Bislang herrscht jedoch Unwissenheit darüber, welches derjenige Propulsionspunkt ist, der zu einer Minimierung der Maßstabeffekte führen würde. Daher wird entweder der Selbstpropulsionspunkt des Modells (MSPP) oder der Selbstpropulsionspunkt der Großausführung (SSPP) gewählt.

Shin u. a., [2012](#) untersuchten den Einfluss des Propulsionspunktes auf die hydrodynamischen Koeffizienten und das Manövrierverhalten des KVLCC1 und KVLCC2. Hierfür führten sie gefesselte Modellversuche für MSPP und SSPP durch. Bei der systembasierten Prognose wurden von Shin u. a., [2012](#) mit MSPP stabilere Vorhersagen als mit SSPP erzielt.

Berücksichtigung der Maschinencharakteristik: In der Großausführung kommt es beim Manövrieren in vielen Fällen zu einer unbeabsichtigten Reduzierung der Motordrehzahl. Die Ursache ist der Anstieg des erforderlichen Drehmoments infolge der Reduzierung der axialen Propelleranströmung, da die Schiffsgeschwindigkeit während des Manövers zurückfällt. Die Maschinencharakteristik wird bei der Manövrierprognose basierend auf gefesselten Manövrierversuchen in Verbindung mit einem mathematischen Koeffizientenmodell meist nicht berücksichtigt. In der Dissertation von (Haack, [2006](#)) werden die Zusammenhänge zwischen der Charakteristik der Antriebsanlage und den Manövriereigenschaften sehr ausführlich behandelt. Es wurde ein bestehendes Simulationsprogramm um das Verhalten der Maschinenanlage erweitert. Das Simulationsprogramm basiert allerdings auf einem modularen Kraftmodell und nicht auf einem Koeffizientenmodell, sodass die dort gemachten Ansätze nicht auf das in diesem Vorhaben verwendete mathematische Modell übertragen werden können.

Berücksichtigung der Umweltbedingungen: Die wahren Umweltbedingungen, die sich u. a. aus den Umwelteinflüssen Seegang, Wind und Strömung ergeben, werden in Manövrierprognosen basierend auf mathematischen Modellen bislang selten und nur unzureichend berücksichtigt. Wenn Umweltbedingungen berücksichtigt werden, geschieht dies oft nur für Einzelaspekte und nicht für alle Umwelteinflüsse. Der Einfluss der Umweltbedingungen auf die Manövriereigenschaften, insbesondere auf die charakteristischen Merkmale wie beispielsweise den Drehkreisdurchmesser, wird in der Prognose meist nur durch empirische Korrekturen einbezogen. Vereinfachte Ansätze zur Berücksichtigung von Wind und Strömung sind beispielsweise in (Lewandowski, [2004](#)) zu finden. Aus den Vereinfachungen resultiert zum einen, dass sich die Prognosen auf teilweise oder vollständig

idealisierte Bedingungen wie Tiefwasser, glattes Wasser und Windstille beziehen. Die bislang unzureichende quantitative Erfassung der Umwelteinflüsse auf das Manövrieren führt andererseits dazu, dass Großausführungsmessungen schwer um diese Einflüsse korrigiert werden können und ein Vergleich mit Modellversuchsergebnissen schwer herzustellen ist, was eine Validierung von Modellversuchen beeinträchtigt.

RANS-basierte Manövrierprognosen mittels eines mathematischen Modells: Der erste international durchgeführte Workshop zur Verifizierung und Validierung der Manövriervorhersageverfahren SIMMAN'08 (Stern und Agdrup, 2008) hat gezeigt, dass Manövriervorhersageergebnisse für gleiche Testfälle mit einer erheblichen Bandbreite streuen. Hier von sind alle Vorhersagemethoden betroffen. Lediglich das einzige voll auf RANS-basierte Simulationsverfahren von Cura Hochbaum (2008) zeigte eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Manövern für die Fälle KVLCC1 und KVLCC2 und somit, dass numerische Verfahren grundsätzlich in der Lage sind, das Manövrierverhalten in der Gesamtheit korrekt zu prognostizieren.

Die Grundlage für diese von Cura Hochbaum, 2006 entwickelte Vorgehensweise wurde in einem vom BMWi geförderten und an der SVA Potsdam durchgeführten Vorhaben gelegt (Lübke, 2006). Das Verfahren wurde bislang nur in wenigen Anwendungsfällen angewendet und enthält zahlreiche Vereinfachungen. In den im Workshop SIMMAN'08 untersuchten Fällen wurden nur drei der vier beim Manövrieren relevanten Freiheitsgrade betrachtet. Berücksichtigt wurden die Längsbewegung, das Driften sowie das Gieren. Das Rollen wurde nicht erfasst. Dies führte in den angesprochenen Testfällen zu keinen nennenswerten Genauigkeitsverlusten der Prognose, da es sich bei den untersuchten Schiffen um Tanker handelte. Diese Schiffe sind durch eine geringe Geschwindigkeit und durch eine hohe Anfangsstabilität gekennzeichnet, sodass das Rollen in diesen Anwendungsfällen nur eine untergeordnete Rolle spielt. Das verwendete mathematische Modell beschränkte sich folglich auch auf die Abhängigkeiten von Längsbewegung, Driften, Gieren sowie Ruderwinkel. Nach dem heutigen Stand fehlt eine Validierung des Verfahrens für Anwendungsfälle, in denen Rollen bzw. Krängung von Bedeutung sind. Darüber hinaus wurden in den genannten Anwendungsfällen die virtuellen gefesselten Versuche ohne freie Wasseroberfläche und damit ohne das schiffseigene Wellensystem bzw. eine eventuelle Veränderung der dynamischen Schwimmlage (Trimm und Absenkung) simuliert. Auch diese Vereinfachung führt nur zu geringen Genauigkeitsverlusten, da aufgrund der geringen Geschwindigkeiten der Tanker das schiffseigene Wellensystem moderat ausfällt.

Das Potenzial der RANS-Verfahren wurde bereits im vom BMBF unterstützten Forschungsvorhaben „Einsatz numerischer Verfahren zur Berechnung des Manövrierverhaltens“ (18S0068 B) (Cura Hochbaum, 1997), (Cura Hochbaum, 1998) und in einzelnen Teilvorhaben der Verbundvorhaben ROLL-S (18S0171) und HEIS (18S0192), siehe (El Moctar und Bertram, 2002) sowie (Cura Hochbaum und Vogt, 2002) und (Cura Hochbaum und Vogt, 2003) demonstriert. Das oben erwähnte Vorhaben MANUV belegt ebenfalls, dass die hydrodynamischen Bewegungskoeffizienten, wie in diesem Fall für Unterwasserfahrzeuge, sehr gut mittels RANS-Berechnungen bestimmt werden können (Lübke, 2008).

Die Qualität numerisch ermittelter hydrodynamischer Kräfte bzw. der hieraus ableitbaren hydrodynamischen Koeffizienten ist abhängig von der physikalischen Wirklichkeitsnähe der durchgeführten Simulation. Numerische Strömungssimulationen sind in der Lage, statische Fälle wie Schrägschleppversuche gut nachzubilden. Die Nachbildung dynamischer Versuche ist nicht unüblich. In den meisten Fällen werden die freie Wasseroberfläche und die Veränderung der Schwimmlage des manövrierenden Schiffes jedoch nicht berücksichtigt. Es existieren derzeit weltweit nur sehr wenige auf RANS basierte Manövriersimulationen mit Berücksichtigung aller vier Freiheitsgrade und der freien Wasseroberfläche einschließlich der Anpassung der Schwimmlage, die noch dazu für die direkte Berechnung der Großausführung eingesetzt werden kann. Die Vereinfachungen werden meist mit der Begründung eingeführt, die Effekte wären insbesondere für die jeweils untersuchten Fälle weniger relevant. Eine Quantifizierung hierzu ist bislang nicht bekannt.

Bislang werden die hydrodynamischen Koeffizienten aus den virtuellen gefesselten Versuchen für die Modellausführung ermittelt. Der Einfluss der Maßstabeffekte bei der Prognose für die Großausführung kommt daher im gleichen Maße zum Tragen wie bei der Prognose basierend auf Modellversuchen. Die Wahl des Propulsionspunktes ist wie in den gefesselten Modellversuchen auch in den virtuellen gefesselten Versuchen für die Gesamtwirkung der Maßstabeffekte entscheidend.

Approximation der Propellerwirkung beim Manövrieren durch Volumenkraftmodelle:

Während eines Rudermanövers wird der Propeller wegen der Gier- und Driftbewegung des Schiffes schräg angeströmt. Diese Schräganströmung wirkt sich in zweifacher Hinsicht auf das Manövrierverhalten des Schiffes aus. Mit der Schräganströmung eines Propellers geht in erster Linie eine Veränderung des Schubes einher, was einen entsprechenden Einfluss auf die Längskomponente der Schiffsgeschwindigkeit hat. Darüber hinaus erzeugt

ein schräg angeströmter Propeller eine Querkraft. In Verbindung mit dem wirkenden Hebelarm resultiert ein entsprechendes Moment. Dieses Moment kann der Kreisfahrt des Schiffes entgegenwirken, es resultiert beispielweise ein größerer Drehkreisdurchmesser. Der Einfluss der Propellerquerkräfte auf das Manövrierverhalten ist bislang nur unzureichend untersucht.

In der numerischen Simulation des manövrierenden Schiffes wird die Propellerwirkung durch entsprechende Volumenkraftmodelle approximiert. Bisherige Volumenkraftmodelle sind nicht in der Lage, die aus der Schräganströmung resultierende Schubreduzierung sowie die Propellerquerkräfte zufriedenstellend zu berücksichtigen. Zwei Ursachen kommen hierbei zum Tragen. Zum einen sind in den Modellen keine geeigneten Daten zu den Propellerkräften bei Schräganströmung des Propellers hinterlegt. Anders als für eine rein axiale Anströmung des Propellers liegen für Schräganströmung nur wenige Ergebnisse aus Serienuntersuchungen vor. Die bisherigen experimentellen Untersuchungen beschränkten sich zudem oft auf kleine Winkel. Moderne Propellerberechnungsverfahren werden seit ca. 20 Jahren auch auf die Berechnung schräg angeströmter Propeller erweitert (Sheng, 1994). Zum anderen ist die Implementierung des Modells im RANS-Verfahren entscheidend darüber, wie aus den zur Verfügung stehenden Daten die wirksamen Propellerkräfte mittels entsprechender Interpolationstechniken für eine gegebene Geschwindigkeitsverteilung für eine gegebene Propellerdrehzahl approximiert werden. Im Forschungsvorhaben RAMA (Lübke, 2006) und in anderen Untersuchungen zeigte sich, dass die Variation des Schubes in Abhängigkeit von der Zustromrichtung nicht ausreichend wiedergegeben werden konnte. Es wird erwartet, dass eine Verbesserung des Volumenkraftmodells zu genaueren Manövrierverprognosen führen wird.

Teil II.

Darstellung der Ergebnisse

NICHT ZUR VERÖFFENTLICHUNG

8. Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Rahmen des Projektes CAPTIVMAN wurden die Maßstabeffekte bei der Manövrierprognose für einen Ein- und einen Zweischrauber eingehend untersucht. Die Analyse basiert einerseits auf experimentell und numerisch durchgeführten gefesselten Versuchen und andererseits auf prognostizierten Rudermanövern.

Es wurde ein RANS-Verfahren für die numerische Simulation gefesselter Versuche weiterentwickelt. In den virtuellen gefesselten Versuchen wurde die Schwimmlage frei gegeben und es wurde gezeigt, dass dies einen nennenswerten Einfluss auf Seitenkraft und Giermoment haben kann. Die virtuellen Versuche wurden auch für die Reynoldszahl der Großausführung durchgeführt, was wertvolle Erkenntnisse für die Klärung der Maßstabeffekte lieferte. An der TUB wurde ein neues Volumenkraftmodell zur Approximation der Propellerkräfte entwickelt, welches direkt die Schräganströmung berücksichtigt. Das Modell basiert auf der umfangreichen experimentellen und numerischen Analyse schräg angeströmter Propeller. Das mathematische Modell für die Manöverprognose wurde in mehrfacher Hinsicht weiterentwickelt. Mit diesem ist nun die Berücksichtigung von Wind und Wellen bei der Prognose von Rudermanövern möglich.

Zusammen mit dem Projektpartner HSVA wurden umfangreiche Modellversuche durchgeführt, deren Ergebnisse einerseits der Validierung der numerischen Verfahren, andererseits zur Untersuchung der Maßstabeffekte und zur Validierung der Manöverprognoseverfahren dienten.

Es wurde insgesamt eine gute, zu Teilen auch sehr gute Übereinstimmung der Prognoseverfahren für das Manövrierverhalten von Schiffen erreicht. Hierbei zeigte sich, dass Effekte infolge des Propulsionspunktes und der Reynoldszahl häufig geringer sind, als die Abweichungen der Prognoseverfahren untereinander. Für den Zweischrauber konnten Abweichungen zwischen der Prognose basierend auf gefesselten Versuchen und den Messungen mit frei fahrendem Modell nicht abschließend geklärt werden.

Die messtechnische und numerische Untersuchung der Kräfte am schräg angeströmten Propeller lieferte wichtige Ergebnisse. Die primäre Propellerquerkraft ist stark abhängig von der Propellergeometrie, dem Winkel der Schräganströmung und dem Fortschrittsgrad.

Im Falle des Propellers des Einschraubers beträgt diese für einen typischen Fortschrittsgrad bis zu 20 % des Schubes.

Folgende Beobachtungen bezüglich der Maßstabseffekte können zusammengefasst werden:

- Der Propulsionspunkt hat in den Z-Versuchen nur einen geringen Einfluss auf die Überschwingwinkel. Auf das zeitliche Verhalten wirkt sich dieser hingegen messbar aus. Mit geringerer Drehzahl, d. h. mit zunehmender Propellerentlastung, nehmen Anschwenkzeit, Stützzeit und Rückdrehzeit zu.
- Der Propulsionspunkt besitzt beim Drehkreisversuch vor allem auf den Vorausweg und den taktischen Durchmesser einen nicht vernachlässigbaren Einfluss — beide Kennwerte steigen mit geringerer Drehzahl. Der stationäre Drehkreisdurchmesser bleibt weitestgehend unverändert.
- Für den Einschrauber geht aus den Prognosen basierend auf den virtuellen gefesselten Versuchen hervor, dass die Wahl des Modellselbstpropulsionspunktes gegenüber des Propulsionspunktes der Großausführung zu einer insgesamt besseren Übereinstimmung mit der Großausführung führt.
- Für den Zweischrauber kann keine eindeutige Schlussfolgerung hinsichtlich des geeigneteren Propulsionspunktes getroffen werden. Zum einen sind die Effekte aufgrund des großen Maßstabes des Modells gering, zum anderen sind die Aussagen der einzelnen Prognoseverfahren sehr indifferent.
- Inwiefern sich für gefesselte Modellversuche i. A. ein optimaler Propulsionspunkt im Vorfeld bestimmen lässt, kann basierend auf den Ergebnissen des Vorhabens keine Aussage getroffen werden. Hierfür müssten weitere Schiffe untersucht werden.
- Für das homogen angeströmte Ruder konnte kein eindeutiger Einfluss der Reynoldszahl auf die Kräfte mittels Messungen im K27 festgestellt werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die maximal mögliche Reynoldszahl bei $Rn \approx 2,3 \cdot 10^6$ lag und dass die Oberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Rudermodelle einen Einfluss auf die Ergebnisse besitzt.

Das Forschungsvorhaben hat ein mal mehr gezeigt, wie schwierig es ist, zuverlässige Großausführungsmessungen durchzuführen. Hierbei sind weniger die Umweltbedingungen und deren Korrektur, sondern viel mehr die Schnittstelle zwischen Schiff und Messtechnik sowie die Schiffssteuerung das größte Problem.

Basierend auf den Ergebnissen für die beiden untersuchten Schiffe ist keine allgemeingültige Aussage zum Einfluss des Rollens auf das Manövrierverhalten möglich. In beiden Fällen

ist die Rollbewegung moderat und die Auswirkung auf die prognostizierten Rudermanöver gering.

Bei den Workshops SIMMAN 2008 und SIMMAN 2014 hat sich gezeigt, dass die Prognose von Rudermanövern erheblichen Streuungen unterliegt. Hieran gemessen liegen die im Rahmen von PREMAN erzielten Prognoseergebnisse in einem engen Bereich.

Für die Durchführung von virtuellen gefesselten Versuchen können die folgenden Empfehlungen gegeben werden:

- Die Berechnungen sollten für die Reynoldszahl der Großausführung durchgeführt werden. Das Verfahren muss hierfür vorab auf die Abhängigkeit vom dimensionslosen Wandabstand untersucht werden.
- Die dynamischen Versuche sollten mit freier Wasseroberfläche und Anpassung der Schwimmlage durchgeführt werden. Falls der zeitliche Rahmen oder die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten dies nicht ermöglichen, wird empfohlen, die Berechnungen gänzlich ohne freie Wasseroberfläche durchzuführen.
- Die Verwendung eines Propeller-Volumenkraftmodells hoher Qualität, das die Abhängigkeit von Schub und Drehmoment von der realen Propelleranströmung ausreichend genau erfasst, wird dringend empfohlen.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt Herrn Msc. Yao Jianxi, der die RANS-Berechnungen des drehenden Propellers durchgeführt hat. Ferner gilt ein großes Dankeschön all jenen Mitarbeitern des Fachgebietes Dynamik Maritimer Systeme, die das Projekt unterstützt haben.

Ohne die großzügige Bereitstellung der beiden Schiffe für die Großausführungsmessungen durch die Reedereien HARREN UND PARTNER und HAPAG LLOYD wären diese nicht möglich gewesen. Vielen Dank für dieses Engagement.

Zu guter Letzt sei natürlich auch dem Projektträger Jülich für die organisatorische Begleitung und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Bereitstellung der Finanzmittel gedankt.