



**Schlussbericht zum FuE-Vorhaben  
„Entwicklung eines automatischen Positionierungssystems für  
Schiffe mit Voith-Schneider-Propellern“**

**Teilvorhaben  
„Untersuchungen zum Einfluss der Operationsbedingungen von  
Querstrahlrudern auf die experimentelle Simulation zum dyna-  
mischen Positionieren mit Rollstabilisierung (DPQuer)“**

Bericht 5050

Potsdam, August 2021

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  <b>Untersuchungen zum Einfluss der Operationsbedingungen von Querstrahlrudern auf die experimentelle Simulation zum dynamischen Positionieren mit Rollstabilisierung</b>  Schlussbericht zum FuE-Vorhaben <b>„Entwicklung eines automatischen Positionierungssystems für Schiffe mit Voith-Schneider-Propellern“</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Fröhlich, M.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 28.02.2021
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH Marquardtter Chaussee 100 14469 Potsdam	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 5050
	10. Förderkennzeichen 03SX428D
	11. Seitenzahl 50
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  Projektträger Jülich Postfach 61 02 47 10923 Berlin	13. Literaturangaben 44
	14. Tabellen 13
	15. Abbildungen 32
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Die Zielstellung im Verbundprojekt war es, für Schiffe mit dem Voith-Schneider-Propeller (VSP) eine durchgehende Methodik für den simulationsbasierten Entwurf von Basis-DP-Systemen (DP0-System) zu entwickeln und zu validieren. Dafür verfolgte die SVA Potsdam mit dem Teilvorhaben das Ziel, das Verhalten der Schuberzeugung von Querstrahlrudern bei DP-Operationen, unter Berücksichtigung der Motionstabilisierung, auf Basis von Messungen und numerischen Berechnungen zu untersuchen und damit die Entwicklung der DP-System-Regelung zu unterstützen. Dafür wurden die notwendigen experimentellen und numerischen Untersuchungen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern geplant und an geeigneten Objekten durchgeführt. Zunächst wurden (außerplanmäßig) für die Projektpartner nötige Voruntersuchungen durchgeführt, in denen die Driftkräfte auf das Schiff ‚Edda Fram‘ im Seegang bestimmt wurden. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden sowohl intensive experimentelle als auch numerische Untersuchungen zur Querstrahlrudderdynamik durchgeführt. Die Untersuchungen umfassten folgende Parametervariationen: max./min. Drehzahl, Drehzahländerungsgeschwindigkeit, Form der Drehzahlvariation, Tiefgang, Tunneldurchmesser, Tunnellänge und Krängungswinkel. Hierfür wurden die entsprechenden Vorschiffsgeometrien der ‚Edda Fram‘ inklusive Propellergeometrien im Modellmaßstab für die Versuche in der Schlepprinne (SR) der SVA angefertigt. Weiterhin wurden verschiedene Szenarien für den in der Praxis möglichen Ausfall einzelner Antriebskomponenten eines Schleppermodells (CRT) untersucht. Diese vervollständigten vorangegangene Langzeit-DP-Untersuchungen und dienten der Systemerprobung für die geplanten Großausführungsmessungen.	
19. Schlagwörter Dynamisches Positionieren, Manövrieren, Regelung, Modellversuche, Querstrahlrudder, Großausführungsmessungen	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)
3. title	
<b>Investigations on the influence of the operating conditions of transverse thrusters on the experimental simulation for dynamic positioning with roll stabilisation</b>  Final report on the research project <b>„ Development of an automatic positioning system for ships with Voith-Schneider propellers “</b>	
4. author(s) (family name, first name(s))	5. end of project
Fröhlich, M.	28.02.2021
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no.
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH Marquardter Chaussee 100 14469 Potsdam	5050
	10. reference no.
	03SX428D
12. sponsoring agency (name, address)	11. no. of pages
	50
	13. no. of references
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  Projektträger Jülich Postfach 61 02 47 10923 Berlin	44
	14. no. of tables
	13
15. no. of figures	32
	16. supplementary notes
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract	
<p>The objective of the joint project was to develop and validate a continuous methodology for the simulation-based design of basic DP systems (DP0 system) for ships with Voith Schneider propellers (VSP). Therefore the subproject of the SVA Potsdam pursued the goal of investigating the behavior of the thrust generation of transverse thrusters during DP operations with motion stabilization by means of measurements and numerical calculations, and thus supporting the development of the DP system control. The necessary experimental and numerical investigations were planned in cooperation with the project partners and carried out on suitable test objects. In order to get necessary data for the project partners, (unscheduled) preliminary investigations on the ship 'Edda Fram' were executed and the drift forces in waves were determined. In the further course of the project, comprehensive experimental and numerical investigations into the transverse thruster dynamics were carried out. The following variations of parameters were included: max./min. speed, rate of change in speed, form of speed variation, draft, tunnel diameter, tunnel length and angle of heel. For the purpose of model testing in the towing tank of the SVA, the corresponding foreship geometries of 'Edda Fram' including propeller geometries were manufactured in model scale. Furthermore, different realistic scenarios for the failure of individual propulsion components of a carousel wave tug (CRT) model were examined. These completed previous long-term DP investigations and were used to test the system for the planned full-scale measurements.</p>	
19. keywords	
dynamic positioning, manoeuvring, closed loop control, bow thrusters, model tests, full-scale tests	
20. publisher	21. price

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
Schlussbericht für das Forschungsvorhaben 03SX428D

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH  
Schlussbericht für das Forschungsvorhaben 2072

„Entwicklung eines automatischen Positionierungssystems für Schiffe mit Voith-Schneider-Propellern“

Teilvorhaben „Untersuchungen zum Einfluss der Operationsbedingungen von Querstrahlrudern auf die experimentelle Simulation zum dynamischen Positionieren mit Rollstabilisierung (DPQuer)“

**„Untersuchungen zum Einfluss der Operationsbedingungen von Querstrahlrudern auf die experimentelle Simulation zum dynamischen Positionieren mit Rollstabilisierung (DPQuer)“**

von

Dr.-Ing. Matthias Fröhlich

**beteiligte Forschungseinrichtungen**

- Voith            Voith Schneider Propulsion GmbH & Co. KG  
                  Dr.-Ing. Dirk Jürgens  
                  Alexanderstr. 18  
                  89522 Heidenheim  
                  Tel.: +49 7321 37 6583  
                  Email: [dirk.juergens@voith.de](mailto:dirk.juergens@voith.de)
- TUHH            Technische Universität Hamburg-Harburg  
                  Institut für Fluidodynamik & Schiffstheorie (FDS)  
                  Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud  
                  Schwarzenbergstraße 95 C  
                  21073 Hamburg  
                  Tel.: +49 40 42878 6052  
                  Email: [m.abdel-maksoud@tuhh.de](mailto:m.abdel-maksoud@tuhh.de)
- URO             Universität Rostock – CeMarIS (URO)  
                  Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeinsch  
                  Richard-Wagner-Str. 31 / Haus 8  
                  18119 Rostock  
                  Tel.: +49 381 498 7703  
                  Email: [bernhard.lampe@uni-rostock.de](mailto:bernhard.lampe@uni-rostock.de)
- SVA             Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH  
                  Marquardtter Chaussee 100  
                  Dr.-Ing. Matthias Fröhlich  
                  14469 Potsdam  
                  Tel.: +49 0331 567 12 54  
                  Email: [froehlich@sva-potsdam.de](mailto:froehlich@sva-potsdam.de)

**„Untersuchungen zum Einfluss der Operationsbedingungen von Querstrahlrudern auf die experimentelle Simulation zum dynamischen Positionieren mit Rollstabilisierung“**

Schlussbericht zum FuE-Vorhaben

„Entwicklung eines automatischen Positionierungssystems für Schiffe mit Voith-Schneider-Propellern“

Teilvorhaben „Untersuchungen zum Einfluss der Operationsbedingungen von Querstrahlrudern auf die experimentelle Simulation zum dynamischen Positionieren mit Rollstabilisierung (DPQuer)“

Die Durchführung des Forschungsvorhabens in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH wurde dankenswerterweise vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie durch die Bereitstellung von Fördermitteln ermöglicht.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der SVA wurden im Rahmen des Vorhabens im Zeitraum 01.02.2017 bis 28.02.2021 realisiert.

Dr.-Ing. Matthias Fröhlich  
Projektleiter

Dr.-Ing. Christian Masilge  
Geschäftsführer

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

August 2021

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite
<b>I. Kurzdarstellung</b>	5
I.1 Aufgabenstellung	5
I.2 Voraussetzungen	6
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
I.4 Stand Wissenschaft und Technik	17
I.5 Angestrebter Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik	20
I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	21
<b>II. Eingehende Darstellung</b>	21
II.1 Ergebnisse des FuE-Vorhabens	21
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis	40
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	41
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse	42
II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	42
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	43
Literatur	43

## **I. Kurzdarstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Ziel des Teilvorhabens der SVA Potsdam im Verbundvorhaben war es die Voraussetzungen zu schaffen, die durch Querstrahlruder erzeugten Schubkräfte besser in einem Regelungs- bzw. Allokationssystem zum dynamischen Positionieren abbilden und den Einfluss auf die Effektivität durch verschiedene Einflüsse berücksichtigen zu können.

Das Gesamtvorhaben wurde in 7 aufeinander aufbauende Arbeitspakete (APs) gegliedert, die ausführlich im Leit Antrag beschrieben worden sind.

Zur Erreichung der Ziele des FuE-Vorhabens hat die SVA Potsdam in sehr enger Kooperation mit den Partnern in den folgenden Arbeitspaketen des Verbundvorhabens mitgearbeitet:

#### **AP 1: Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung von dynamischen Windlasten bei der Simulation von DP-Operationen (TUHH)**

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sollte eine Schiffsgeometrie ausgewählt werden. Diese sollte von der SVA für die Modellfertigung vorbereitet und das Labormodell gefertigt werden (1b).

Schnittstellen für das bestehende Simulationsverfahren sollten konzeptioniert und implementiert werden (1c).

#### **AP2: Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung von Strömung in DP-Operationen (TUHH)**

Hierzu waren keine Aktivitäten seitens der SVA eingeplant.

#### **AP3: Einfluss der Interaktion zwischen Schiff und Propeller im Seegang und der Einflüsse auf den Querstrahlruderwirkungsgrad bei DP-Operationen (Voith)**

Für die isolierten Betrachtungen der Querstrahlruderdynamik und Ventilation sollten umfangreiche numerische Berechnungen durchgeführt werden. Zur Validierung war ein generisches Modell zu fertigen, das die Möglichkeit der systematischen Untersuchungen mit Variation der allgemeinen geometrischen Parameter am Querstrahlruder über die numerischen Berechnungen hinaus ermöglichte. Diese sollten für eine von den Projektpartnern gemeinsam definierte Untersuchungsmatrix durchgeführt werden (3.d, 3.e, 3.f).

#### **AP4: Methodik zum systematischen Entwurf des DP-Systems aufgrund des komplexen Simulationsmodells (URO)**

Für die Vorbereitung von Großausführungsmessungen sollten in diesem Arbeitspaket in Verbindung mit AP6 Vorversuche zur Verifizierung des von den Partnern entwickelten DP-Systems durchgeführt werden. Für diese Messungen war vorgesehen, das Laborversuchskonzept zur effizienten Durchführung von DP-Versuchen erstmalig umzusetzen, zu erproben und einzusetzen. Der Fokus in diesem Arbeitspaket zur Erprobung des Messsystems unter realen Versuchsbedin-

gungen wurde auf die Skalierbarkeit und somit die Übertragbarkeit des Simulationsmodells und des DP-Systems auf das Modellschiff gelegt (4.e, 4.f).

#### **AP5: Methodenentwicklung zur Adaption „on demand“ und Selbsteinstellung von DP-Regelsystemen (URO)**

Hierzu waren keine Aktivitäten seitens der SVA eingeplant.

#### **AP6: Analyse und Bewertung der Leistungsfähigkeit des realisierten DP-Systems unter realistischen Einsatzbedingungen (Voith)**

Zur Vorbereitung der Großausführungsversuche sollte das entwickelte Regelungs- und Allokationsmodell, das auf Basis von Simulationsergebnisse eingestellt worden ist, im Modellversuch auf seine Leistungsfähigkeit getestet werden. Es sollte das entwickelte effiziente Laborversuchskonzept eingesetzt werden. Es waren u. a. dynamische Polardiagramme zu erstellen (6.a), der Ausfall von beliebigen Steuerorganen zu simulieren (6.b) und die eingestellten Parameter für die Großausführungsmessungen zu validieren.

#### **AP7: Validierung der Parameter des DP-Systems durch Experimente (Voith)**

Die für die Großausführungsmessungen eingestellten Parameter sowie die erweiterten Algorithmen des DP-Systems sollten im Modellversuch überprüft werden (7.b).

Letztendlich waren die Ergebnisse aller Arbeitspunkte zu analysieren und für die Auswertung entsprechend aufzubereiten. Es sollte ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt und Perspektiven für die Anwendung und die zukünftige Erweiterung des entwickelten Systems aufgezeigt werden. Dieser Punkt war in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durchzuführen.

An den geplanten Großversuchsmessungen sollte die SVA nur in beratender Funktion teilnehmen (7e).

## **I.2 Voraussetzungen**

Die SVA arbeitet bereits seit über 60 Jahren kontinuierlich auf dem Gebiet der Untersuchung von Schiffskörpern. Ein wesentlicher Schwerpunkt der Hydromechanik, das Bewegungsverhalten von Schiffen in Wechselwirkung mit den Steuer- und Propulsionsorganen wurde in der SVA langjährig bearbeitet. Mit zahlreichen Projekten wird das verdeutlicht. Im Folgenden werden einige dieser Projekte aufgeführt.

In Zusammenarbeit mit der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt wurde ein Simulationsalgorithmus im Forschungsvorhaben „SLOWMAN“, Fkz.: 03SX2417 [1] entwickelt, der das Bewegungsverhalten von Schiffen bei kleinen Geschwindigkeiten simuliert. Dabei gehen die Widerstandsbeiwerte, die Windkräfte und die Seegangkräfte 2. Ordnung von Schiffen über den Umfang von 360° ein. Hier wurden für drei konventionelle Schiffsrümpfe die Widerstandsbeiwerte berechnet und im Modellversuch untersucht.

Im BMWI-Forschungsvorhaben POSTHRUST, Fkz.: IW090164 „Thruster für dynamische Positionierung“ [2], wurde die Interaktion zwischen einer Plattform und angebrachten Steuerantrieben un-

tersucht. Ein solches Szenario ist beispielhaft für die Untersuchung eines Teilaspekts zur Bestimmung der DP Capability für Schiffe und Plattformen.

Im BMWI-Forschungsvorhaben, Fkz.: MF120107 „Bestimmung der Kräfte und Momente auf das Unterwasserschiff über Anströmwinkel von  $360^\circ$ “, wurden die Kräfte über  $360^\circ$  durch stationäre Strömung auf spezielle Schiffe des Offshore-Bereichs untersucht [3].

Weitere Untersuchungen beziehen sich auf spezielle Propulsionsorgane und deren numerische Modellierung sowie der Identifikation des Manövrierhaltens von Unterwasserfahrzeugen und seegehender Schiffe [4] ...[8].

In [9] wurde ein Verfahren entwickelt, dessen Ziel es war, Grundlagen für ein System zur Bestimmung der Manövierkennwerte seegehender Schiffe zu schaffen. Darin sind Tools zur Beschreibung der Schiffsbewegungen einschließlich der hydrostatischen Beiwerte, Analyseverfahren für Elementarmanöver und ein spezielles Datenbanksystem zur Speicherung der Manövierkennwerte enthalten.

In der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam wurden zahlreiche Untersuchungen zur Weiterentwicklung einer Querstrahlruderanlage (QRA) realisiert, u.a. [10], [11], [12], [13], [14]. Dabei wurde das Know-how für den Versuchsaufbau und für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Kennwerte und der Kavitationseigenschaften einer QRA erarbeitet. Die entwickelten Berechnungsverfahren ermöglichen die Nachrechnung der Kennlinien von Querstrahlruderpropellern und die Analyse der Kennwerte einer QRA.

Zudem sind mehrere Forschungsthemen und Industrieprojekte in Zusammenarbeit mit Voith erfolgreich durchgeführt worden, in denen der VSP-Antrieb und dessen Anwendung thematisiert wurde [15], [16], [17], [18], [19], [20], u.a.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben DPQuer war auf eine Gesamtlaufzeit von drei Jahren angelegt. Die zeitliche Planung für alle Partner ist dem Balkenplan der Tabelle 1 zu entnehmen.

#### **Schiffsmodell**

In Abstimmung mit den Partnern wurde beschlossen, die Geometrie der Edda Fram (SVA Modell M1600) für die Untersuchungen im FuE-Projekt zu verwenden. Nach Verwendung des bereits existierenden Modells der Edda Fram in vorherigen Forschungsthemen, musste dieses für neue Laboruntersuchungen teilweise neu gefertigt, bzw. aufwendig überarbeitet werden. Die Modellnummer wurde dabei beibehalten.

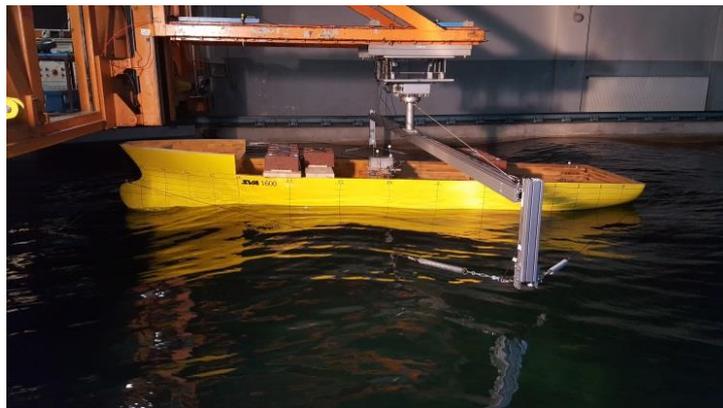
#### **Laboruntersuchungen**

In der Diskussion zum Projekt-Auftakttreffen am 01.03.2017 hatte sich herauskristallisiert, dass die Projektpartner Voruntersuchungen zur Bestimmung der Driftkräfte auf das Schiff durch Seegang benötigen, um die zu entwickelnden mathematischen Modelle zu validieren. Belastbare Daten waren in der Literatur nicht zu finden. Deshalb wurden Voruntersuchungen in der Schlepprinne der SVA durchgeführt, die aber nicht Bestandteil der geförderten Arbeitspakete waren.



Für die Bestimmung der Driftkräfte im Seegang musste ein neuer Versuchsaufbau in enger Abstimmung mit der TUHH konzipiert werden, der von der SVA realisiert wurde (Abbildung 1). Durch diesen Versuchsaufbau kann das Modell durch ein Federsystem den Wellen in einem bestimmten Bereich folgen und über 360° geschwenkt werden. Damit ist es möglich, realistische Wellendriftkräfte für beliebige Welleneinfallswinkel zu messen.

Es wurden zahlreiche Labormessungen bei regelmäßigem Seegang bei verschiedenen Welleneinfallswinkeln durchgeführt, deren Ergebnisse den Projektpartnern zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt wurden.



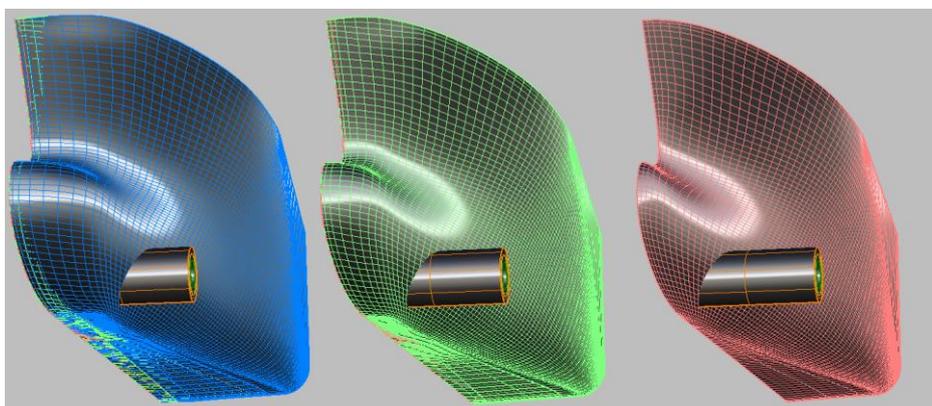
**Abbildung 1: Modell der Edda Fram mit neuem Versuchsaufbau zur weiteren Messung von Driftkräften im Seegang**

### **Projekttreffen**

Am 20. Juli 2017 in Potsdam und am 28. September 2017 in Heidenheim fanden Projekttreffen statt, in denen sich die Partner über den Stand der jeweiligen durchgeführten Arbeiten informierten und die Ergebnisse zusammen diskutierten. Das weitere Vorgehen im Gesamtprojekt wurde jeweils miteinander abgestimmt.

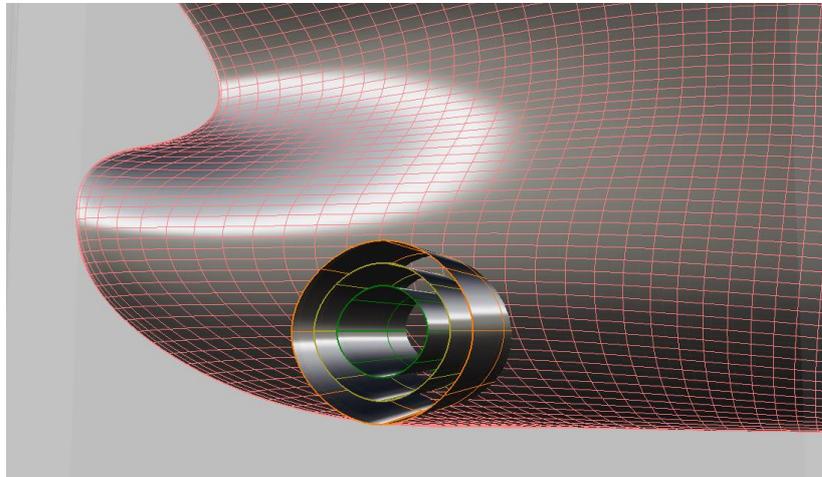
### **Untersuchungen zum Einfluss Querstrahlrudergeometrie auf die Dynamik**

Für die Untersuchungen zum Einfluss der Querstrahlrudergeometrie auf die Dynamik der Schubumkehr wurde die verwendete Rumpfform im Vorschiffsbereich in der Breite verzerrt, um verschieden lange Querstrahlrudergeometrien, bei Beibehaltung möglichst aller anderen Parameter, zu erhalten (Abbildung 2).



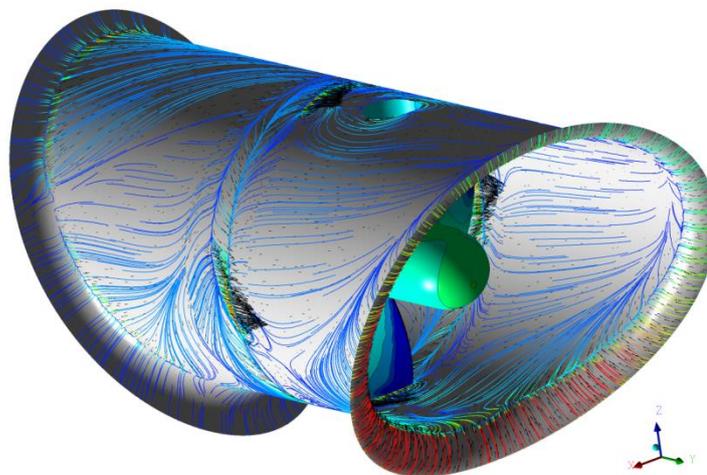
**Abbildung 2: Edda Fram, Verzerrung des Vorschiffsbereichs für unterschiedliche Querstrahlruderlängen**

Ebenso wurden die Geometrien für die Durchmesseränderung des Querstrahlruders verwirklicht, um auch diesen Einfluss untersuchen zu können. (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Edda Fram: Durchmesservariation der Querstrahlruder**

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch numerische Simulationen unterstützt. Abbildung 4 zeigt die Durchströmung einer Querstrahlrudervariante.



**Abbildung 4: Stromlinien im Querstrahlruder**

#### **Arbeiten der SVA im Zeitraum 01.02.2018 – 31.01.2019**

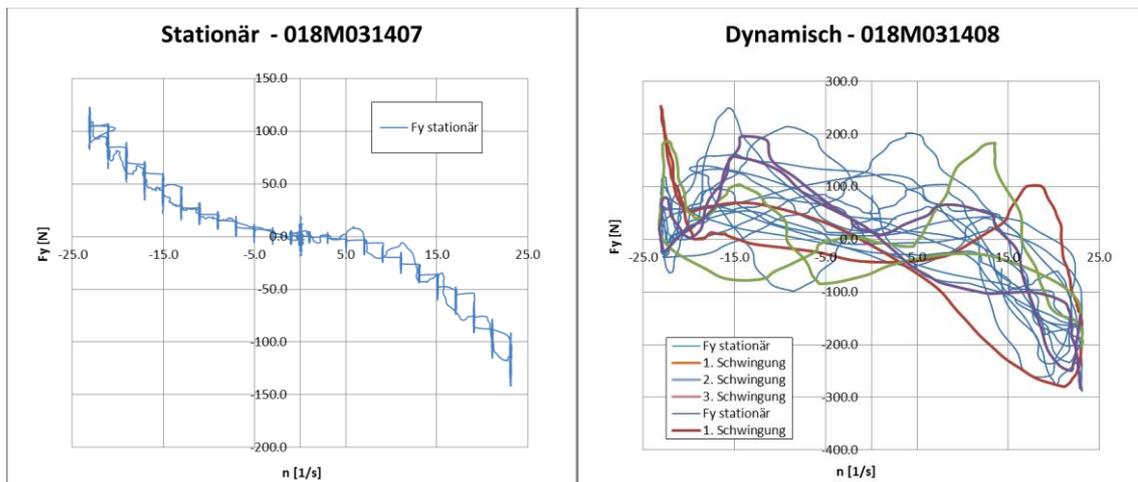
##### **Laboruntersuchungen**

Im 1. Halbjahr 2018 wurden Kraftmessungen und DP-Versuche in der Schlepprinne der SVA mit dem Modell der Edda Fram in Zusammenarbeit aller Projektpartner durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 100 Messungen realisiert, deren Ergebnisse den Projektpartnern ebenfalls zur weiteren Auswertung und Validierung zur Verfügung gestellt wurden.



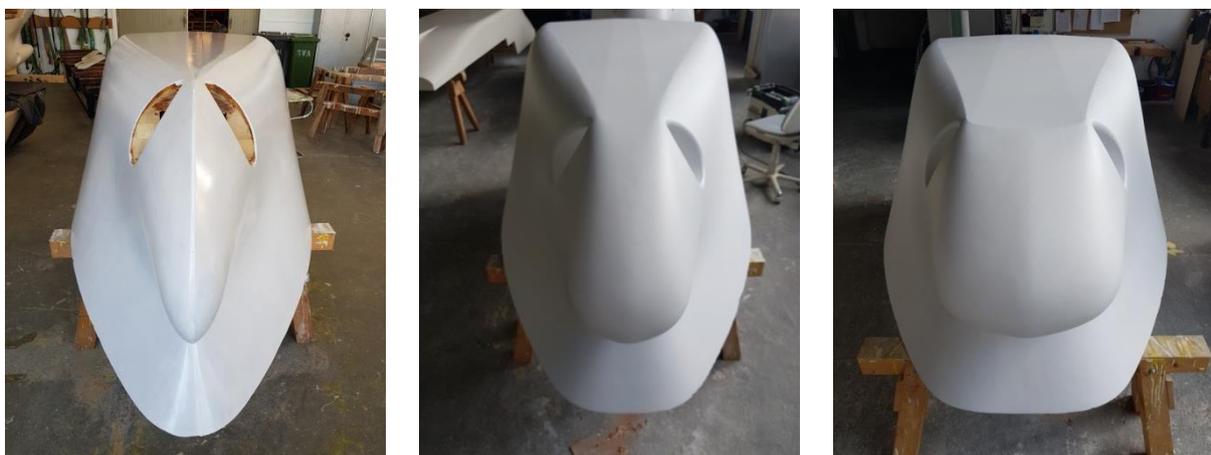
**Abbildung 5: Modell der Edda Fram während der DP-Versuche im April 2018**

Für die Untersuchung der Querstrahlerdynamik wurden stationäre und dynamische Versuche durchgeführt. Abbildung 6 zeigt exemplarisch Ergebnisse dieser Versuche.



**Abbildung 6: Modellversuchsergebnisse: Kräfte aufs Modell mit stationärem Querstrahl- schub (links) und dynamischem, sinusförmigen Querstrahl- schub (rechts)**

Die für die Untersuchungen des Einflusses der Dynamik und des Lufteinbruchs gefertigten Vor- schiffe sind in Abbildung 7 zu sehen:



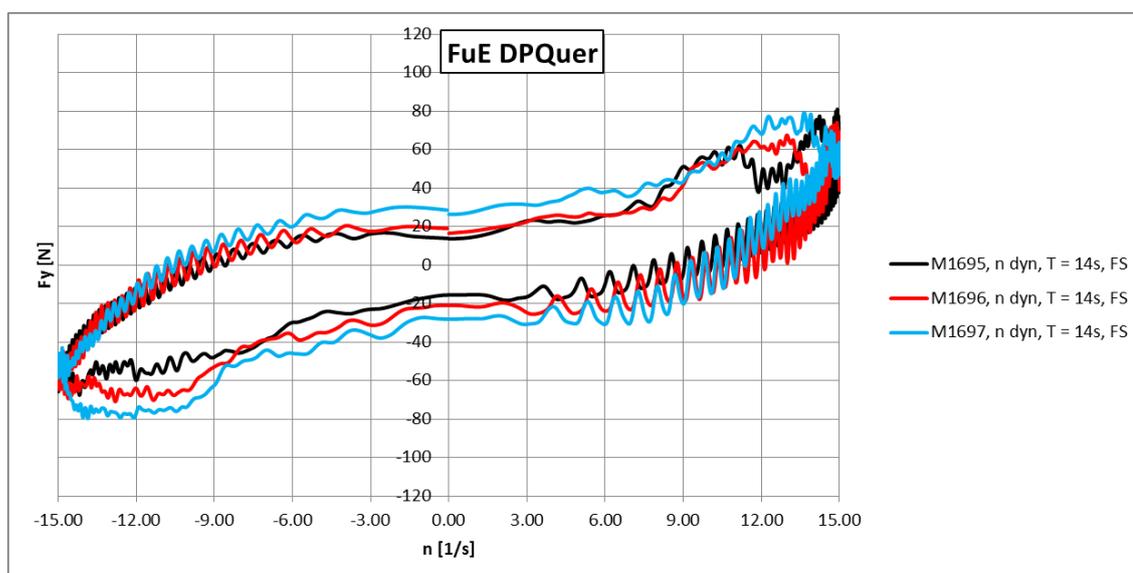
**Abbildung 7: Gefertigte Vorschiffe in verschiedenen Breiten**

## Projekttreffen

Am 31. Januar 2018 in Rostock und am 19. März und 06. Juni 2018 in Hamburg fanden Projekttreffen statt, in denen sich die Partner über den Stand der jeweiligen durchgeführten Arbeiten informierten und die Ergebnisse zusammen diskutierten. Das weitere Vorgehen im Gesamtprojekt wurde jeweils miteinander abgestimmt.

## Untersuchungen zum Einfluss Querstrahlrudergeometrie auf die Dynamik

Umfangreiche CFD-Berechnungen zur Dynamik der Querstrahlruder wurden durchgeführt. Die Kurven in Abbildung 8 zeigen Beispielergebnisse des Hysterese-Effekts der Querkraft bei variablen Perioden der Schubumkehr und der Tunnellänge des Querstrahlruders.



**Abbildung 8: Hysterese-Effekte bei dynamischer Schubumkehr des Querstrahlruders in Abhängigkeit der Tunnellänge**

Allgemeine quantitative Aussagen wurden nach Auswertung aller Berechnungsergebnisse und der Validierungsversuche getroffen. Die Ergebnisse wurden in die Regelung des DP-Systems eingepflegt, um die Genauigkeit der Allokation zu erhöhen.

## Arbeiten der SVA im Zeitraum 01.02.2019 – 31.01.2020

### Laboruntersuchungen

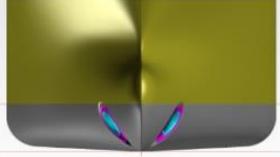
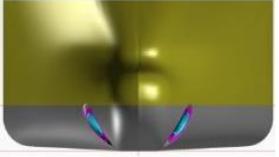
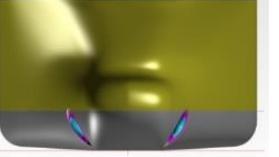
Die Untersuchungen der Querstrahlerdynamik und des Einflusses des Lufteinbruchs für die Querstrahlerkräfte wurden mit stationären und dynamischen Versuchen fortgesetzt. Die untersuchten Konfigurationen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Dabei wurden jeweils stationäre und dynamische (lineare als auch sinusförmige Drehzahlwechsel) Versuche durchgeführt. Die im Antrag angegebenen Abhängigkeiten des dynamischen Hysterese-Verhaltens

- Maximale/Minimale Drehzahl
- Drehzahländerungsgeschwindigkeit
- Form der Drehzahlvariation (sinusförmig, linear)
- Tiefgang - Austauschungsgrad der QRA (Lufteinbruch)
- Tunneldurchmesser der QRA
- Breite des Vorschiffs (Länge der QRA-Tunnels)

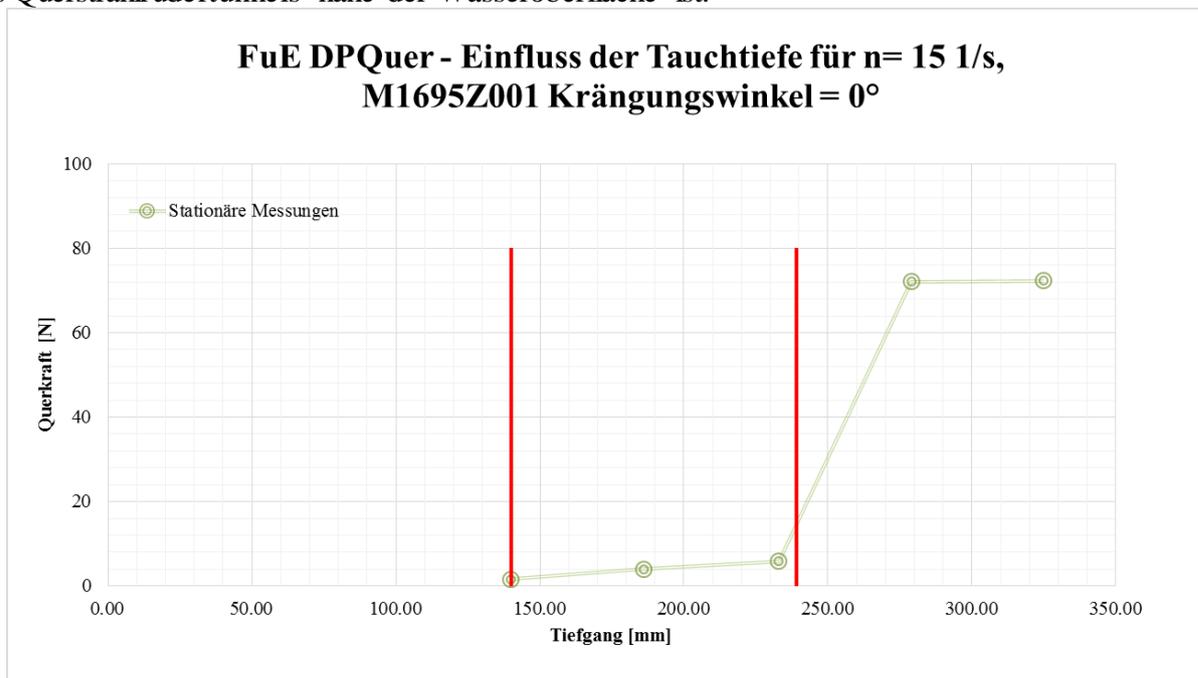
- Krängungswinkel
- *Versperrungsverhältnis durch die Antriebsgondel (Masterarbeit, nicht Bestandteil des FuE-Vorhabens)*

wurden jeweils an mindestens einer Konfiguration gemessen. Oft wurde die Untersuchung der gleichen Abhängigkeit für mehrere Konfigurationen realisiert, um auch Kreuzkorrelationen zu finden.

**Tabelle 2: Untersuchte Konfigurationen**

	M1695	M1696	M1697
			
Krängungswinkel	0°, 10°	0°, 5°, 10°	0°, 10°
Tiefgang	$T_1 = 325.0$ mm $T_2 = 232.5$ mm $T_3 = 140.0$ mm	$T_1 = 325.0$ mm $T_2 = 232.5$ mm $T_3 = 140.0$ mm	$T_1 = 325.0$ mm $T_2 = 232.5$ mm $T_3 = 140.0$ mm

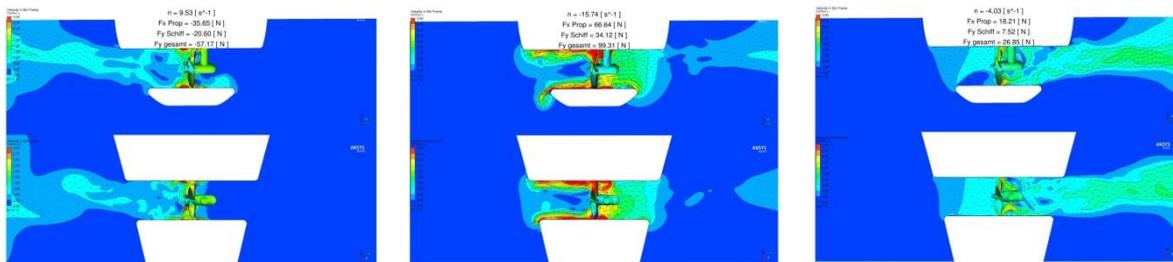
Das Diagramm in Abbildung 9 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der Versuche. Hier wurden für die Konfiguration M1695Z001 für den Krängungswinkel 0° neben den drei geplanten Tiefgängen der Matrix zwei zusätzliche Tiefgänge ( $T_4 = 183.3$  mm und  $T_5 = 278.5$  mm) untersucht, um den Lufteinbruch detaillierter zu untersuchen. Der Übersicht halber sind hier in Abbildung 9 nur die stationären Werte angegeben. Die instationären Messungen ergeben das gleiche Bild. Es ist gut zu sehen, wie der Lufteinbruch und damit die starke Reduzierung der Querkraft eintreten, sobald der obere Rand des Querstrahlrudertunnels nahe der Wasseroberfläche ist.



**Abbildung 9: Detaillierte Betrachtung der Auswirkung des Lufteinbruchs auf die Querkraftentwicklung für 5 Tiefgänge**

### CFD-Untersuchungen

Umfangreiche CFD-Berechnungen zur Dynamik der Querstrahlruder wurden weitergeführt. In Abbildung 10 ist das Strömungsfeld im Querstrahlruder bei dynamischen Umsteuervorgängen in drei unterschiedlichen Zeitschritten dargestellt



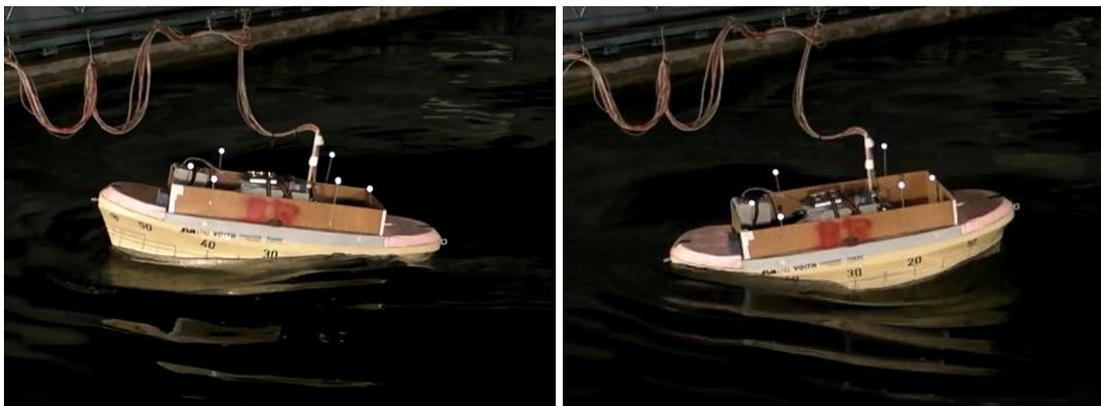
**Abbildung 10: Ausschnitte des zeitlichen Verlaufs der Strömung im Querstrahlruder in den dynamischen Berechnungen**

### Projekttreffen

Ein Projekttreffen fand am 5. Mai 2019 in Rostock statt. Es wurden die jeweils erreichten Ergebnisse diskutiert und die Versuche für September 2019 vorbereitet.

### Laboruntersuchungen

Für den Punkt Modifizierung der Simulationsmethode hat die SVA bereits Langzeit-DP-Versuche mit den Partnern durchgeführt. Verschiedene Szenarien für den in der Praxis möglichen Ausfall einzelner Antriebskomponenten wurden untersucht. Zur Vervollständigung dieser Untersuchungen und für die Erprobung der Systeme für die geplanten Großversuchsmessungen wurden weitere Versuche im September in der Schlepprinne der SVA mit einem Modell des für die Großversuchsmessungen vorgesehenen Schleppers (CRT) durchgeführt. Die Auswertung dieser Versuche erfolgte durch die Projektpartner. Mit diesen Versuchen wurden die Arbeitspunkte Laborversuchsmessungen der SVA abgeschlossen. In Abbildung 11 ist das Schleppermodell während einer Versuchsserie mit Seegang und durch geringe Fahrtgeschwindigkeit simulierter Strömung in der Schlepprinne dargestellt.



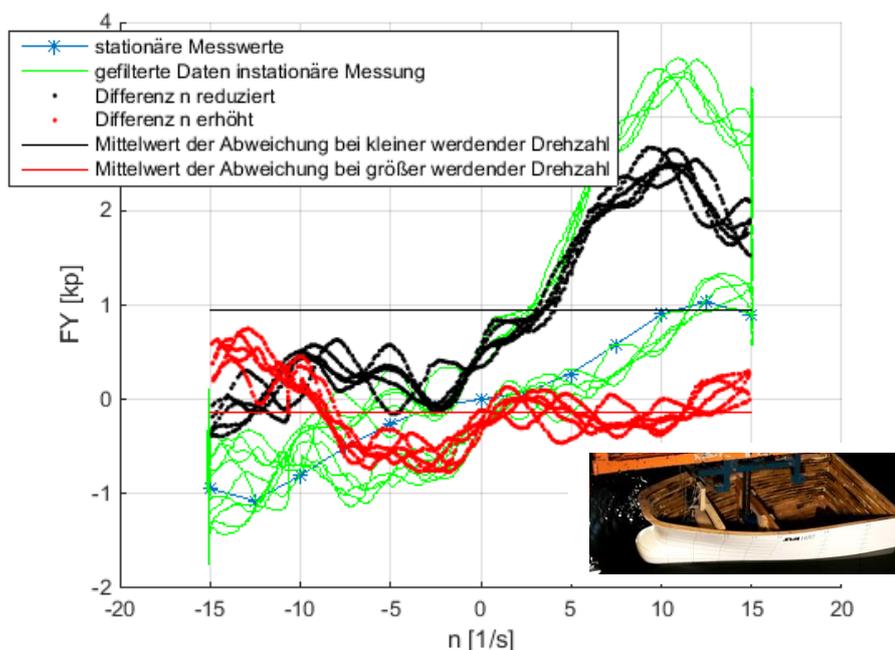
**Abbildung 11: CRT, M1742 bei  $H_{W1/3} = 3.0 \text{ m}$ ,  $\mu = 45^\circ$ ,  $V_c = 0.75 \text{ ms}^{-1}$**

Die Auswertung der umfangreichen Untersuchungen der Dynamik der QRA und des Einflusses des Lufteinbruchs für die Querstrahlerkräfte durch stationäre und dynamische Laborversuche des vorangegangenen Berichtszeitraumes wurden abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden im SVA-Bericht Nr. 4875 zusammengefasst. Es erfolgten detaillierte Analysen zu den Auswirkungen der Variation des Tiefgangs, des Krängungswinkels, des Tunneldurchmessers der QRA, der Breite des Vor-

schiffs, der Drehzahländerungsgeschwindigkeit und der Form der Drehzahlvariation (sinusförmig, linear) auf die Querkraft der QRA.

Das Diagramm in Abbildung 12 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der zahlreichen Versuchsreihen. Hier wurde für die Konfiguration M1697Z001 für den Krängungswinkel  $\varphi = 10^\circ$ , den Tiefgang  $T_2$ , bei linearer Drehzahländerung innerhalb einer Zeitdauer von  $t_{\text{linear}} = 4$  s, die mittlere Abweichung zwischen stationärer und dynamischer Messung dargestellt.

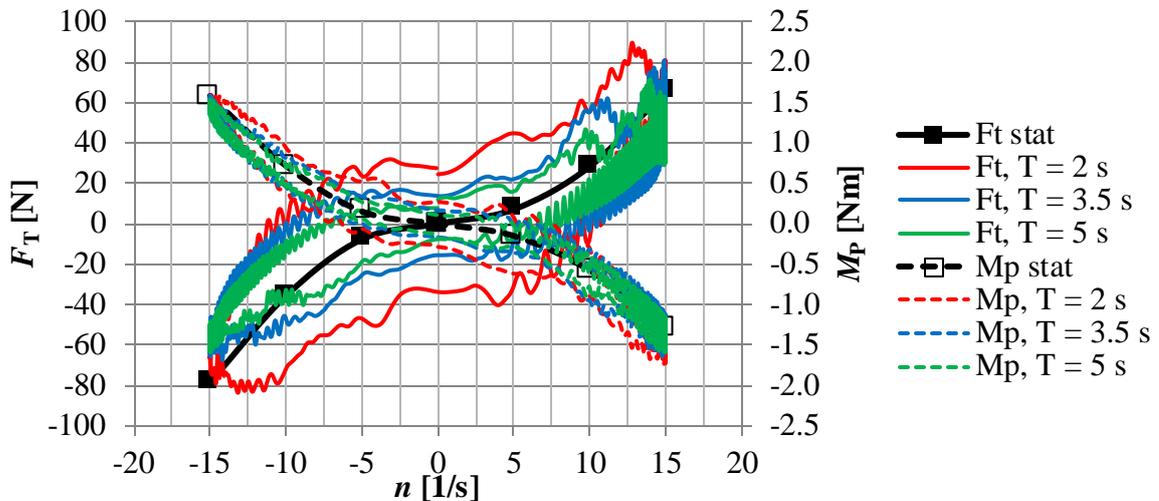
Der Krängungswinkel hat auf die Querkraft nur dann einen signifikanten Einfluss, wenn durch die Krängung Ventilation auf einer Seite der QRA entsteht. Sind beide Öffnungen getaucht, wie es bei  $T_1$  bei jeder Konfiguration der Fall war, sind keine Unterschiede herauszumessen. Anderenfalls kommt es zu einem asymmetrischen Querkraftverhalten, wie in Abbildung 12 zu erkennen.



**Abbildung 12: Mittlere Abweichung zwischen stationärer und dynamischer Messung, M1697Z001,  $T_2$ ,  $\varphi = 10^\circ$ , lineare Drehzahländerung,  $t_{\text{linear}} = 4$  s**

### CFD-Untersuchungen

Die umfangreichen CFD-Berechnungen zur Dynamik von Querstrahlrudern wurden im vorangegangenen Berichtszeitraum planmäßig abgeschlossen. Die Berechnungen erfolgten sowohl für konstante Drehzahlen als auch für zeitlich aufgelöste veränderliche Drehzahlen d.h. instationäre Lastwechsel. Der überwiegende Teil der Berechnungen erfolgte ohne Berücksichtigung einer freien Wasseroberfläche. In einigen Fällen, bei geringem Tiefgang sowie bei Krängung, wurde diese zur Bestimmung des Einflusses von Ventilation berücksichtigt. Die Übereinstimmung mit vergleichbaren Messergebnissen ist überwiegend gut. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden im SVA-Bericht Nr. 4918 zusammengefasst. Am Beispiel von Abbildung 13 werden Berechnungen bei unterschiedlicher Drehzahländerungsrate gezeigt.



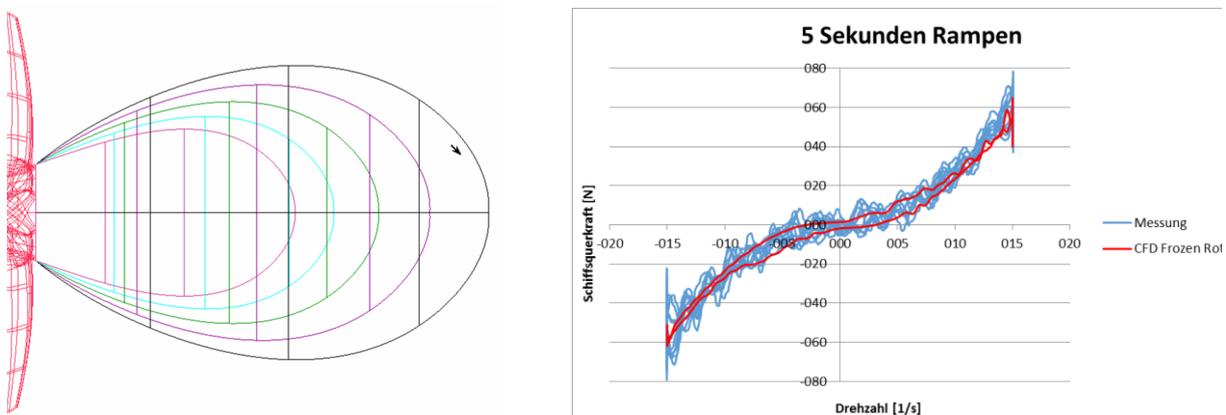
**Abbildung 13: Einfluss unterschiedlicher Drehzahländerungsraten (mit Sinus-Verlauf)**

In einer von der SVA betreuten Masterarbeit einer Studentin der TU Berlin wurden zusätzliche, eigenständige Untersuchungen zum Einfluss der Versperrung der Antriebsgondel einer QRA auf das dynamische Hysterese-Verhalten des Schubes durchgeführt. Laborversuchsergebnisse der SVA wurden zur Validierung des Simulationsmodells zur Verfügung gestellt. Für die Simulationen zur Versperrung wurden 5 Gondelvarianten untersucht, die in folgender Tabelle zusammengestellt sind.

**Tabelle 3: Gondelvarianten**

	maximaler Gondeldurchmesser	Gondellänge	Versperrung
Gondel 1	61,3mm	121,6mm	16,7%
Gondel 2	70,6mm	135,6mm	22,2%
Gondel 3	81,4mm	151,7mm	29,4%
Gondel 4	93,7mm	170,3mm	39%
Gondel 5	107,9mm	191,6mm	51,8%

Ein Vergleich zwischen Modellversuch und numerischer Berechnung ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Variation des Gondeldurchmessers (links) und Vergleich CFD/EFD für eine Drehzahländerungsrate für M1696Z002**

Es konnte gezeigt werden, dass für verschiedene Konfigurationen des Betriebes des Querstrahlruders insgesamt eine gute Übereinstimmung der CFD-Berechnungen mit den Experimenten erzielt werden konnte, so dass das Verfahren im Weiteren für Simulationen genutzt werden kann.

### **Projekttreffen**

Ein Projekttreffen fand am 13. September 2019 in Hamburg statt. Auf diesem Treffen wurde die Planung für die letzte Versuchsserie im September in der SVA diskutiert. Weiterhin wurden die jeweiligen Bearbeitungszustände jedes einzelnen Partners vorgestellt und besprochen. Ein weiteres Treffen fand am 17. Dezember in Rostock statt. Thema dieses Treffens war die Diskussion zu den abschließenden Großversuchsmessungen im Sommer 2020 sowie die erforderlichen Arbeiten zu der daraus resultierenden kostenneutralen Themenverlängerung.

## **I.4 Stand Wissenschaft und Technik**

### **Bekannte Konstruktionen, Verfahren, Schutzrechte**

#### **Querstrahlruder**

Querstrahlruder (Bug- und/oder Heckstrahler) erzeugen eine Schubkraft quer zur Schiffslängsachse (Abbildung 15) und werden standardmäßig in Schiffe eingebaut. Sie sind auf Containerschiffen, Yachten, Marineschiffen, Forschungsschiffen, usw. wie auch auf Offshore-Versorgern zu finden. Sie dienen zum besseren Manövrieren bei kleinen Geschwindigkeiten. Dies ist der Fall wenn eine Ruderwirkung aufgrund der kleinen Strömungsgeschwindigkeiten nicht gegeben ist (Heckstrahler) bzw. ein Manövrieren auf engstem Raum notwendig wird.



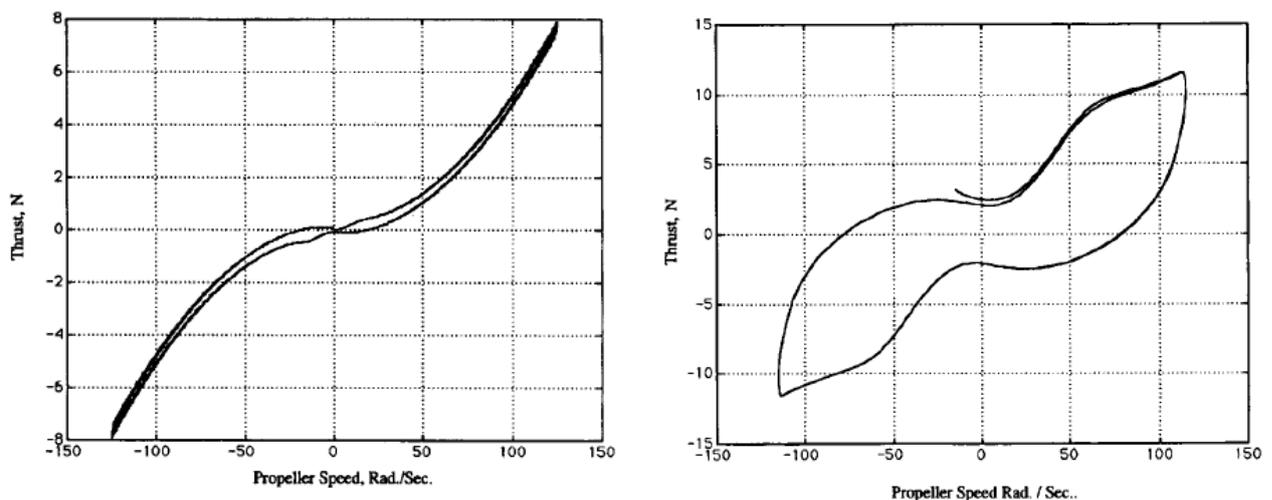
**Abbildung 15: Beispiel für Bugstrahler am Schiff (Quelle: <http://www.brunvoll.no>)**

Sind die Querstrahlruder ursprünglich dafür konzipiert worden in beschränktem Wasser (z.B. Hafenmanöver) das Schiff zu navigieren, werden sie heutzutage auch intensiv zum dynamischen Positionieren bei Offshore-Aufgaben verwendet.

Beim Manövrieren/Positionieren interagieren die Querstrahlruder mit anderen Propulsoren sowie, abhängig von den Einbaubedingungen, mit dem Schiffsrumpf.

### Dynamik von Querstrahlrudern

Durch die wechselnden Betriebs- und Umweltbedingungen variiert die Effizienz von Querstrahlrudern [21] und Einflüsse für Schiffsgeschwindigkeit, Kavitationszahl, etc. müssen für die Vorhersage des erzeugten Querstrahlschubes Berücksichtigung finden. Darüber hinaus kommt es, um eine gegebene, definierte Position zu halten, aufgrund der dynamischen Umweltbedingungen zu schnellen Schub- und Gegenschubwechseln am Querstrahlruder. Der Schub- und Gegenschubwechsel verläuft jedoch nicht zwangsläufig synchron mit der Änderung der Schubrichtung durch Drehzahl- bzw. Steigungsänderung am Propeller. Bei schneller Änderung der Schubrichtung baut sich der entsprechende Schub erst nach einer endlichen Zeit wieder auf [22], [23], [24]. Abbildung 16 illustriert dies am Beispiel eines untersuchten Querstrahlruders. Regelungssysteme, die für das dynamische Positionieren ausgelegt werden, müssen diese dynamischen Effekte berücksichtigen, um eine gegebene Position optimal halten zu können.



**Abbildung 16: Änderung des Querstrahlschubes in Abhängigkeit der Propellerdrehrate bei langsamer (links) und schneller Änderung der Propellerdrehzahl [23]**

### Auswirkung von Lufteinbruch (Ventilation) in der Schuberzeugung von Querstrahlrudern

Zu Lufteinbruch bei Querstrahlrudern kommt es im Allgemeinen bei schwerem Wetter in Kombination mit hohen Wellen, denen das Schiff ausgesetzt ist [25]. Dabei kann es zu kurzfristigen Schubverlusten der Querstrahlruder von bis zu 50% kommen. Untersuchungen zum Phänomen Lufteinbruch wurden vor allem für Propeller und Düsenpropeller durchgeführt [25] ... [35].

Es wird zwischen drei Lufteinbruchphänomenen unterschieden [27]:

- Oberflächenwirbel – Charakterisiert durch Schubverlust durch Luftwirbelbildung, die den Propellerflügel erreicht. Hier tritt teilweise Lufteinbruch und damit Schubverlust am Propeller auf,
- Oberflächendurchstoß – Der Propeller ist so dicht an der Wasseroberfläche, dass die Flügel die Wasseroberfläche durchstoßen. Hier entsteht ein uniformer Schubverlust,
- Intermittierend – beide obengenannten Mechanismen treten in Wechselwirkung auf.

Abbildung 17 stellt das für Propeller charakteristische Phänomen in Abhängigkeit der Fortschrittsziffer dar [27].

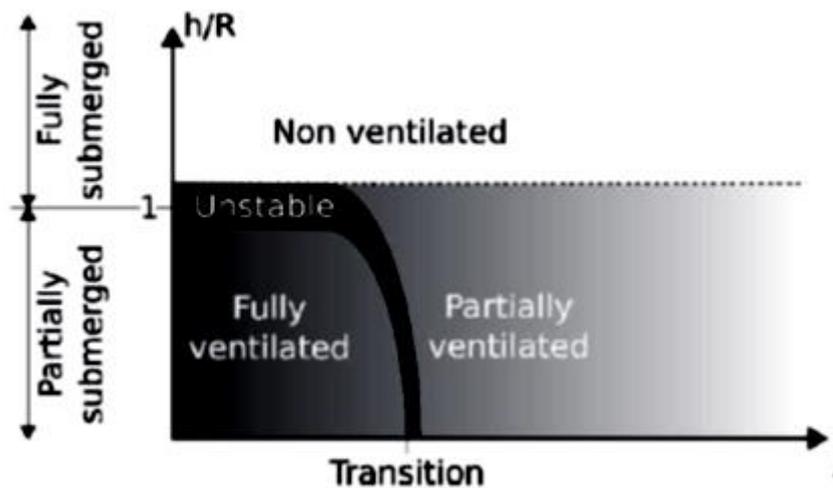


Abbildung 17: Regime des Lufteinbruchs bei Propellern [27]

In [26] wird gezeigt, dass sich der Ventilationsprozess von freien und Düsenpropellern klar unterscheidet. Es wird ein möglicher Schubverlust von 40 % für den freien Propeller und von 20 % für den Düsenpropeller nachgewiesen. Für den Düsenpropeller wird der Schubverlust vor allem an der Düse festgestellt.

Palm zeigt in [25], dass der Schubverlust durch Ventilation bei konventionellen Propellern stärker ausgeprägt ist als bei Voith-Schneider-Propellern.

MARINTEK hat in einer Serie mit Industriepartnern Untersuchungen zum Lufteinbruch für Querstrahlruder durchgeführt [28]. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind jedoch nicht veröffentlicht und somit für die SVA und deren Partner für das Forschungsprojekt nicht nutzbar.

Van Dijk [33] zeigt, dass es für Querstrahlruder zu einem totalen Schubeinbruch durch Lufteinbruch kommen kann. Zudem ist die Zeitdauer den Schub wieder aufzubauen signifikant und hängt in diesem Falle von der Länge des Tunnels ab. Es wurde herausgefunden, dass der Schubverlust durch Lufteinbruch durch Wellen für folgende Bedingungen am größten war:

- Große Wellenhöhen
- Bow und Bow quartering Wellenrichtungen
- Begegnungsfrequenzen die dicht an den Eigenfrequenzen des Schiffes für Tauchen, Rollen und Stampfen liegen
- Wellenrichtungen in denen die Welle die Öffnung des Querstrahlruders trifft

Savio und Steen [29] zeigen in ihrer Auswertung von Lufteinbruchereignissen, dass diese bei dem von ihnen untersuchten Offshore Supply Vessel 45 mal in 18 Monaten stattfanden. Diese Lufteinbruchereignisse fanden bei signifikanten Wellenhöhen von 2 – 5.5 m. Bei stärkerem Seegang fuhr das untersuchte Schiff nicht raus.

In [34] wird ein Verfahren zur Simulation von DP vorgestellt in dem auch der Schubabfall im Querstrahlruder durch Lufteinbruch berücksichtigt wird. Dieses Verfahren geht von den Unterschieden der Wasserhöhen im Querstrahlruder und um das Schiff aufgrund von Wellen aus. Durch empirische Faktoren, die im Modellversuch bestimmt werden müssen, kann damit die Ventilation berücksichtigt werden.

Ruth und Smogeli [35] haben ein mathematisches Modell beschrieben, welches den Einfluss des Lufteinbruches im DP-Prozess berücksichtigt.

In den ITTC Guidelines zur Durchführung von Modellversuchen mit dynamischen Positionierungssystem (ITTC – Recommended Procedures and Guidelines 7.5 – 02 – 07 - 03.6) wird beschrieben, dass sich Lufteinbruch in einer schnellen Drehzahlerhöhung am Querstrahlruder äußern kann.

Das Verbundprojekt PROPSEA [31] befasst sich mit der Propulsion von Schiffen im Seegang. Die Partner im Projekt sind die Versuchsanstalt MARINTEK, Rolls-Royce, die Technische Naturwissenschaftliche Universität Norwegens NTNU, die Universität Duisburg-Essen, die Technische Universität Hamburg-Harburg, der Germanische Lloyd, die Reederei Farstad Shipping und die Develogic GmbH. Von der Universität Duisburg-Essen wird im Teilprojekt LastProp die Beanspruchung eines Propellers infolge von Schiffsbewegungen bei Seegang und Manövriervorgängen numerisch ermittelt. Die Technische Universität Hamburg-Harburg entwickelt im Teilprojekt ProSee [30] numerische Verfahren weiter, die die instationären Einflüsse von Seegangsparametern wie Eintauchtiefe und Änderung der Schwimmelage infolge der Schiffsbewegung auf das zeitabhängige hydrodynamische Verhalten von freifahrenden und am Schiff arbeitenden Propellern bestimmen.

In der Analyse der im FuE-Vorhaben vorgenommenen laufenden Recherchen zu neuesten Untersuchungen und Publikationen zu Bugstrahlrudern ergaben sich keine neuen Erkenntnisse bezüglich Dynamik des Querstrahlruders bei Schubumkehr und zum Einfluss der Ventilation in Verbindung mit den geometrischen Parametern (Durchmesser, Tunnellänge, Form der Austrittsöffnung usw.).

## **I.5 Angestrebter Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik**

### **Untersuchungen zur Dynamik von Querstrahlrudern**

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Dynamik der Querstrahlruder (also die Fähigkeit Schub und Gegenschub innerhalb kurzer Zeitintervalle zu erzeugen) zum einen durch die Simulation des DP-Verhaltens bisher nicht richtig erfasst werden kann und zum anderen die Dynamik der Querstrahlruder hinter der der VSPs hinterhersteht. Da für das DP-Verhalten das Zusammenspiel von Querstrahlrudern und VSPs entscheidend ist, ist die Dynamik der Querstrahlruder in einer Simulation und in einer Regelung zu berücksichtigen. Die dazu notwendigen Daten bzw. entsprechende Untersuchungen in der Literatur sind nicht vorhanden. Die Schiffbau-Versuchsanstalt wird daher hierzu systematische Untersuchungen (numerisch wie experimentell) durchführen, die, in Abhängigkeit von dynamischen und geometrischen Parametern der Querstrahlruder, die entsprechenden Daten für die Einbindung in die Simulation zur Verfügung stellen. Das dynamische Verhalten der Querstrahlruder wird dem der VSPs gegenübergestellt. Die Untersuchungsmatrix wird die Abhängigkeit der Dynamik von Querstrahlrudern von folgenden Randparametern beinhalten:

- Länge Querstrahlruder
- Durchmesser Querstrahlruder
- Schubänderung (Drehzahl-/Steigungsänderung)

## **Untersuchungen zur Auswirkung von Lufteinbruch (Ventilation) in der Schuberzeugung von Querstrahlrudern**

Gerade bei hohen Seegängen ist die Gefahr des Lufteinbruches bei Querstrahlrudern gegeben. Bei Lufteinbruch bricht der Querschub ein. Es sollen hier, wie auch bei den Untersuchungen zur Dynamik der Querstrahlruder systematische experimentelle und numerische Untersuchungen stattfinden, die die Größe des Lufteinbruches mit den gegebenen Randparametern (in diesem Falle erweitert durch die Tauchtiefe und den Rollwinkel)

- Länge Querstrahlruder
- Durchmesser
- Schubänderung (Drehzahl-/Steigungsänderung)
- Tauchtiefe
- Rollwinkel

in Verbindung bringen. Insbesondere soll gezeigt werden inwiefern der Lufteinbruch verhindert bzw. reduziert werden kann, wenn das dynamische Positionieren mit einer Rollstabilisierung durchgeführt wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden den Projektpartnern zur Einbindung in die Simulation zur Verfügung gestellt.

Die SVA ist im Zusammenhang mit dem beantragten Forschungsthema daran interessiert, die erworbenen Kenntnisse und Fähigkeiten des dynamischen Positionierens unter Berücksichtigung der Motionstabilisierung auch auf andere Antriebe, wie Z-Antriebe anzuwenden, um damit die Basis für eine möglichst breite Anwendung für Industriekunden anbieten zu können.

## **I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im FuE-Vorhaben wurde mit den Projektpartnern Voith Schneider Propulsion GmbH & Co. KG, Technische Universität Hamburg-Harburg und Universität Rostock – CeMarIS zusammengearbeitet.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Ergebnisse des FuE-Vorhabens**

- **Driftkraftmessungen**

Im Rahmen des Verbundvorhabens DP11, (SVA-Kont.- Nr. 2072) wurden mit dem Modell des Offshore-Support-Vessels „Edda Fram“ M1600Z001 außerplanmäßige Wellendriftkraftmessungen ohne Voith-Schneider-Propeller-Antriebe (VSPs) durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten in zwei verschiedenen Laborversuchsserien bei Variation der Seegangparameter und Wellenbegegnungswinkel in regulären und irregulären Wellen.

Für die Versuche wurde ein neuer Versuchsaufbau konzipiert, mit dem die Eigenbewegungen des Modells im Seegang zugelassen wurden (erzeugt durch Wellenkräfte 1. Ordnung) und die resultierenden Wellendriftkräfte (Wellenkräfte 2. Ordnung) gemessen werden konnten.

Die Ergebnisse in Form der gemessenen Zeitreihen sowie Videoaufnahmen wurden den Partnern des Verbundvorhabens zur weiteren Auswertung und Nutzung zur Verfügung gestellt.

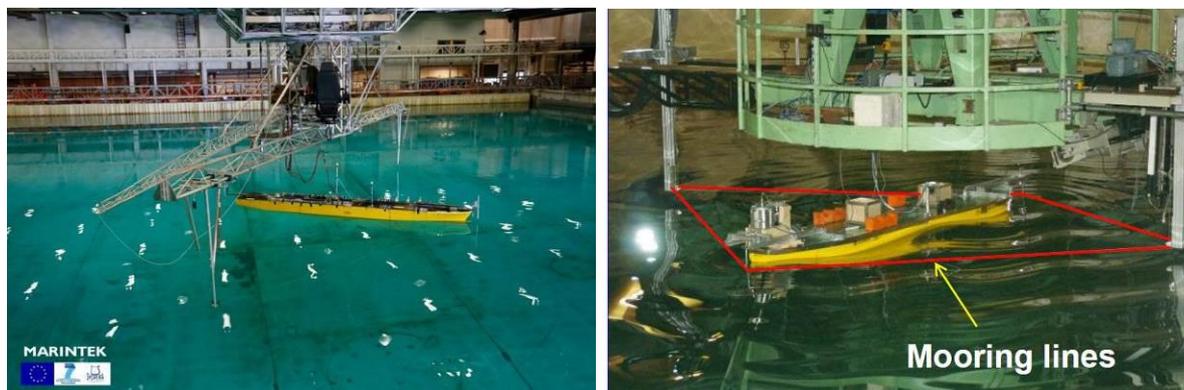
Beim Modell der „Edda Fram“ handelt es sich um einen Neubau eines vorhandenen Modells M1564Z001, das für die geplanten Versuche nicht mehr verwendet werden konnte. Das Modell M1600Z001 wurde aus Holz im Maßstab  $\lambda = 16$  gefertigt, wobei die Bugstrahlruderöffnungen modelliert, aber für die Driftkraftmessungen geschlossen wurden. Die Hauptabmessungen sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

**Tabelle 4: Hauptdaten des Schiffs**

<b>M1600Z001</b>			
Länge zwischen den Loten	$L_{PP}$	[m]	77.40
Breite	$B$	[m]	19.20
Tiefgang	$T$	[m]	5.20
Verdrängung	$\nabla$	[m <sup>3</sup> ]	4918
Modellmaßstab	$\lambda$	[-]	16

Das Modell M1600Z001 wurde für alle Versuche auf den Ladefall  $T = 5.20$  m bei gleichlastiger Schwimmlage eingetrimmt. Die für die Bewegungsmessungen wichtigen Trägheitskenngrößen wurden wie folgt eingestellt:  $k_{xx}/B = 0.31$ ,  $k_{yy}/L_{PP} = 0.27$ ,  $k_{zz}/L_{PP} = 0.27$  und  $\overline{GM} = 1.58$  m.

Vorbild des Versuchsaufbaus waren die Versuchsaufbauten von MARINTEK und CEHIPAR, die im EU-Projekt SHOPERA [36], [37] für die Messung von Wellendriftkräften vorgestellt wurden. Bei diesen Versuchsaufbauten (Abbildung 18) ist das Modell in einem trapezförmigen Feder-Seil-System eingespannt.

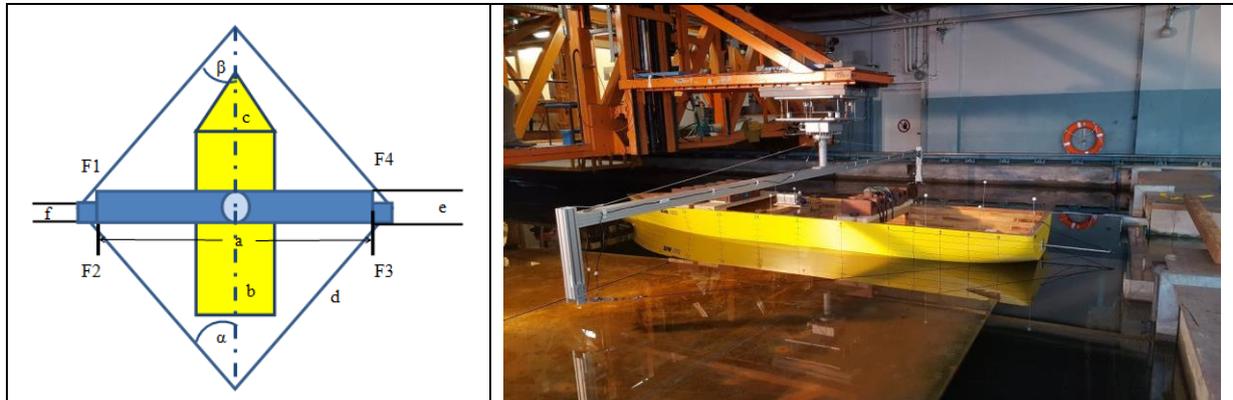


**Abbildung 18: Versuchsaufbau nach MARINTEK und CEHIPAR**

Dieses System ermöglicht es, dass das Modell den Wellenauslenkungen vertikal und horizontal (im Federbereich) folgen kann und den Driftwinkel minimal variiert. Im Gegensatz zu einem fest eingespannten Modell werden dadurch über die Zeit die Driftkräfte bei korrekter Bewegung des Modells gemessen. Die trapezförmige Anordnung stellt sicher, dass die Bedingungen, die durch den Versuchsaufbau gegeben sind bei allen Welleneinfallswinkeln nahezu gleich sind.

Die vier Verbindungsseile sind dabei möglichst leicht zu wählen. Die Federsteifigkeit ist so zu wählen, dass die Eigenfrequenz des Systems in den relevanten Welleneinfallswinkel kleiner als 1/6 der kleinsten Welleneinfallsfrequenz ist. An den Seilen sind Kraftmessglieder angebracht.

Für die SVA wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der die Randbedingungen der Schlepprinne berücksichtigt. Abbildung 19 zeigt die Umsetzung des Versuchsaufbaus in der SVA.



**Abbildung 19: Versuchsaufbau in der Schlepprinne der SVA**

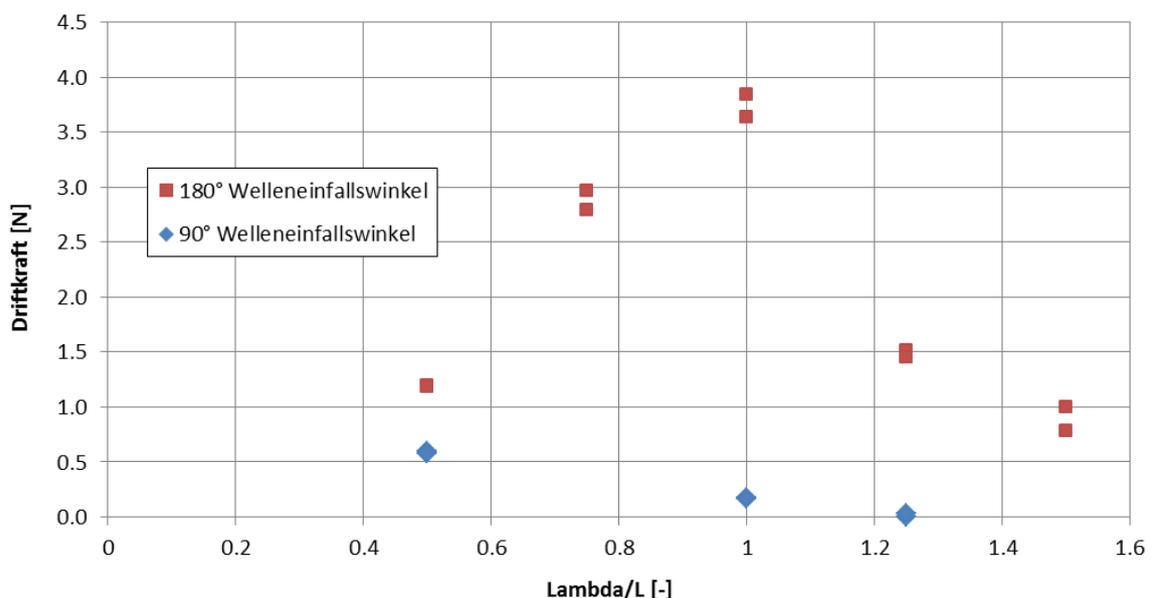
Für die Umrechnung der gemessenen Kräfte des Feder-Seil-Systems in die Kraftkomponenten der Welleneinfallrichtung sind folgende Formeln anzuwenden:

$$F_x = F_1 \cos(\beta) - F_2 \cos(\alpha) + F_3 \cos(\beta) - F_4 \cos(\alpha)$$

$$F_y = - F_1 \sin(\beta) - F_2 \sin(\alpha) + F_3 \sin(\beta) + F_4 \cos(\alpha).$$

Es wurden zahlreiche Kraftmessungen an regelmäßigen Wellen verschiedener Wellenperioden und Wellenamplituden durchgeführt. Zudem wurden vereinzelt irreguläre Wellen mit dem JONSWAP-Spektrum untersucht. Während der Versuche wurden Wellenhöhen, Wellenlängen und Welleneinfallswinkel variiert. Umfang der Versuche und sämtliche Ergebnisse wurden im SVA-Bericht Nr. 5051 zusammengestellt [38].

Abbildung 20 zeigt die Driftkräfte bei Welleneinfallswinkeln von  $90^\circ$  und  $180^\circ$  bei einer Wellensteilheit von  $\lambda/H_w = 44.2$ .



**Abbildung 20: Wellendriftkräfte in Abhängigkeit der Wellenlänge, Wellensteilheit 44.2**

• **Laboruntersuchungen zu Querstrahlruderkräften**

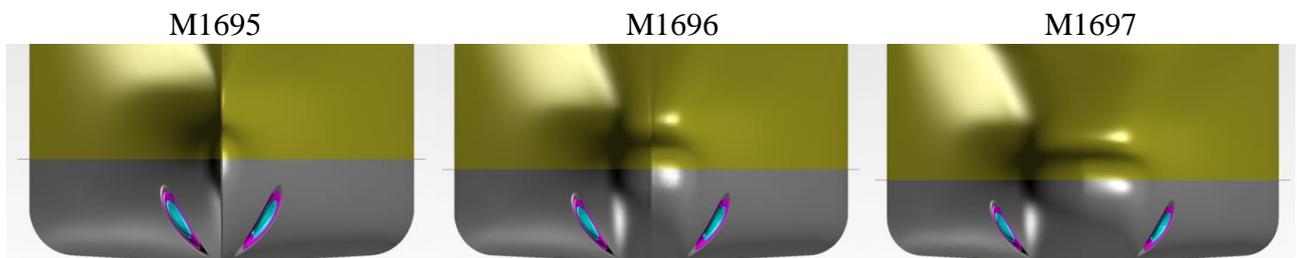
Im Rahmen des FuE-Verbundvorhabens wurden für verschiedene Vorschiffs- und Querstrahlruderkonfiguration stationäre und instationäre Querkraftmessungen mit arbeitender QRA durchgeführt. Als Basis der Vorschiffskonfigurationen wurde das Vorschiff des Offshore-Support-Vessels „Edda Fram“ M1600Z001 ausgewählt und für die Laboruntersuchungen eingesetzt. Durch zahlreiche unmittelbar verfügbarer Ergebnisse zu diesem Modell war dieses für die geplanten weiteren Untersuchungen bestens geeignet. Die Untersuchungen erfolgten unter Variation des Tiefgangs, des Krängungswinkels, des Tunneldurchmessers der QRA, der Breite des Vorschiffs, der Drehzahländerungsgeschwindigkeit und der Form der Drehzahlvariation (sinusförmig, linear).

Die Labormessungen dienten zur Beurteilung der Bugstrahlruderdynamik und der Auswirkungen von Lufteinbruch (Ventilation) auf die Schuberzeugung von QRAs. Der Einfluss folgender Parameter sollte betrachtet werden:

- Tiefgang - Austauschungsgrad der QRA (Lufteinbruch)
- Krängungswinkel
- Tunneldurchmesser des Querstrahlruder
- Breite des Vorschiffs (Länge des QRA-Tunnels)
- Form der Drehzahlvariation (sinusförmig, linear)
- Drehzahländerungsgeschwindigkeit
- Maximale/Minimale Drehzahl

**Vorschiffe**

Für die Variation der Länge der QRA sollten die Eintrittsbedingungen für den Querstrahler möglichst gleich bleiben. Das Vorschiff von M1600 wurde daher durch parallele Sektionen verbreitert. Die Kontur des Vorschiffes an den Querstrahlruderöffnungen konnte somit beibehalten werden. Für das Ausgangsschiff M1600Z001 (Edda Fram) wurden mit dieser Vorgabe neue Vorschiffe (M1695, M1696 und M1697) entworfen und im Maßstab 16 ab Spant 10 gefertigt (Spant 10 – 20). Zeichnungen der Vorschiffe sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Hauptabmessungen der Vorschiffe sind in Tabelle 5 zusammengestellt.



**Abbildung 21: Vorschiffe M1695, M1696 und M1697**

**Tabelle 5: Hauptdaten der Vorschiffsmodelle**

			M1695	M1696	M1697
Länge über Alles	$L_{OS}$	[m]	2.653	2.653	2.653
Breite	$B$	[m]	1.200	1.374	1.550
Designtiefgang	$T_1$	[m]	0.325	0.325	0.325
Verdrängung	$\nabla$	[m <sup>3</sup> ]	0.557	0.700	0.841
Modellmaßstab	$\lambda$	[-]	16	16	16

### Querstrahlruder

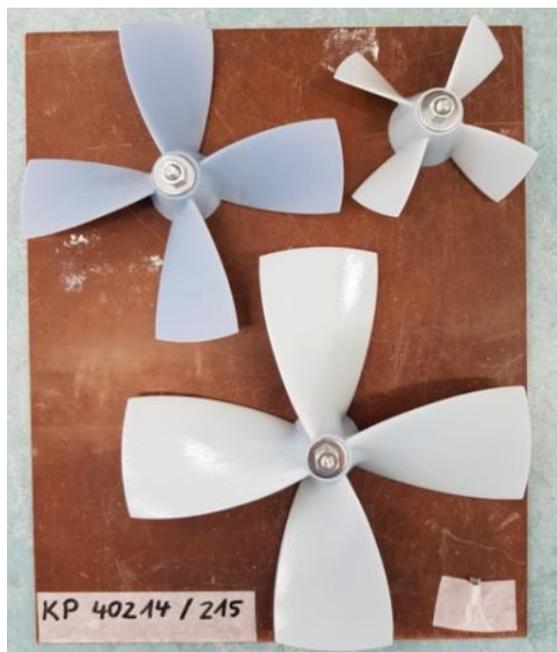
Für jede Vorschiffsvariante sind die QRA-Tunneldurchmesser in drei Stufen variiert worden. Für die unterschiedlichen QRA-Durchmesser erhalten die Vorschiffe jeweils neue Variantennummern.

- Z001 für den QRA-Durchmesser von  $D_1 = 190$  mm,
- Z002 für den QRA-Durchmesser von  $D_2 = 150$  mm,
- Z003 für den QRA-Durchmesser von  $D_3 = 100$  mm.

Die Eintrittsöffnungen der Querstrahler wurde rund (Radius  $r = 0.1 D$ ) gestaltet. Dadurch sollten Strömungsablösung am Eintritt vermieden und die Strömungsverhältnisse im Querstrahler stabiler gestaltet werden.

### Querstrahlruderpropeller

Für die drei QRA-Durchmesser wurden drei Propeller mit den Durchmessern 98 mm (KP40214), 148 mm (KP40212) und 188 mm (KP40215) entworfen und gefertigt (Abbildung 22). Dies entspricht einem Spaltmaß im Modell von 1 mm.



**Abbildung 22: Propeller der Querstrahlruder, KP40212, KP40214 und KP40215**

Die Philosophie für den Entwurf der Propeller war folgende:

- Ausgangsentwurf war Propeller KP40212 mit  $D_P = 148$  mm, der für das Modell der Edda Fram einen Querschub von mind. 132 N erzeugen sollte (äquivalent zu den drei Bugstrahlern der Großausführung). Es handelt sich hierbei um ein symmetrisches Profil, welches den gleichen Schub in beide Drehrichtungen erzeugt.
- Die Geometrie wurde mit SVA-Programm ‚pff22KAPLAN‘ erstellt.
- Für die Propeller KP40214 mit  $D_P = 98$  mm und KP40215 mit  $D_P = 188$  mm wurden die Steigungsverteilungen so geändert, dass jeweils möglichst der gleiche Schub bei gleicher Drehzahl erreicht wird.

### Versuchsaufbau

Für die Versuche wurde die 6-Komponentenkraftmesswaage R250 an den Ausleger des Schleppwagens angebaut (Abbildung 23). Das jeweilige zu untersuchende Vorschiff wurde über einen Flansch, der an einem Schott im Modell angebracht war, an die Messwaage angebunden. Die Position des Flansches im Vorschiffsmodell war jeweils 1462.5 mm vor Spant 10 (Modellmaßstab) bzw. 0.6 m vor der QRA und 415 mm über der Basis (mittschiffs).



**Abbildung 23: Messaufbau für Querkraftmessungen**

Die Vorschiffsmodelle wurden für sämtliche Versuche auf die entsprechenden Ladefälle eingetrimmt.

Für die Querkraftversuche wurden nur die horizontalen Kräfte und Momente (x- und y-Kraft, Moment um die z-Achse) gemessen.

### Versuchsumfang und Versuchsdurchführung

Der Umfang der Versuche ist in Tabelle 6 zusammengefasst. Dabei ist  $\varphi$  der Krängungswinkel.

**Tabelle 6: Untersuchungsmatrix**

			MI695			MI696			MI697		
			Z001	Z002	Z003	Z001	Z002	Z003	Z001	Z002	Z003
Stationäre Messung	$T_1$	$\varphi_1$	X	(X)			X		X		X
		$\varphi_2$							X		
		$\varphi_3$							X		
Stationäre Messung	$T_2$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$					X				
		$\varphi_3$	X				X		X		
Stationäre Messung	$T_3$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$					X				
		$\varphi_3$	X				X		X		X
Stationäre Messung	$T_4$	$\varphi_1$	X								
Stationäre Messung	$T_5$	$\varphi_1$	X								
Dynamische Messung lineare Variation	$T_1$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$							X		
		$\varphi_3$							X		
Dynamische Messung lineare Variation	$T_2$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$					X				
		$\varphi_3$	X				X		X		
Dynamische Messung lineare Variation	$T_3$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$					X				
		$\varphi_3$	X				X		X		X
Dyn. linear	$T_4$	$\varphi_1$	X								
Dyn. linear	$T_5$	$\varphi_1$	X								
Dynamische Messung Sinusvariation	$T_1$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$									
		$\varphi_3$									
Dynamische Messung Sinusvariation	$T_2$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$					X				
		$\varphi_3$	X				X		X		
Dynamische Messung Sinusvariation	$T_3$	$\varphi_1$	X				X		X		X
		$\varphi_2$					X				
		$\varphi_3$	X				X		X		X
Dyn. Sinus	$T_4$	$\varphi_1$	X								
Dyn. Sinus	$T_5$	$\varphi_1$	X								

	Stationäre Messungen
	Instationäre lineare Drehzahländerung
	Instationäre sinusförmige Drehzahländerung

Während der Messungen wurden für ausgewählte Fälle Videos aufgezeichnet.

### Maximale/Minimale Drehzahl

Unter gleichen Bedingungen wurden instationäre Messungen mit variierten max./min. Drehzahlen durchgeführt. Es sollte geprüft werden, ob und in wie weit die Strömungsgeschwindigkeit im Querstrahler den Hysterese-Effekt beeinflusst. Es wurden die max./min. Drehzahlen  $\pm 5$  1/s,  $\pm 10$  1/s,  $\pm 15$  1/s untersucht.

### Drehzahländerungsrate/-geschwindigkeit

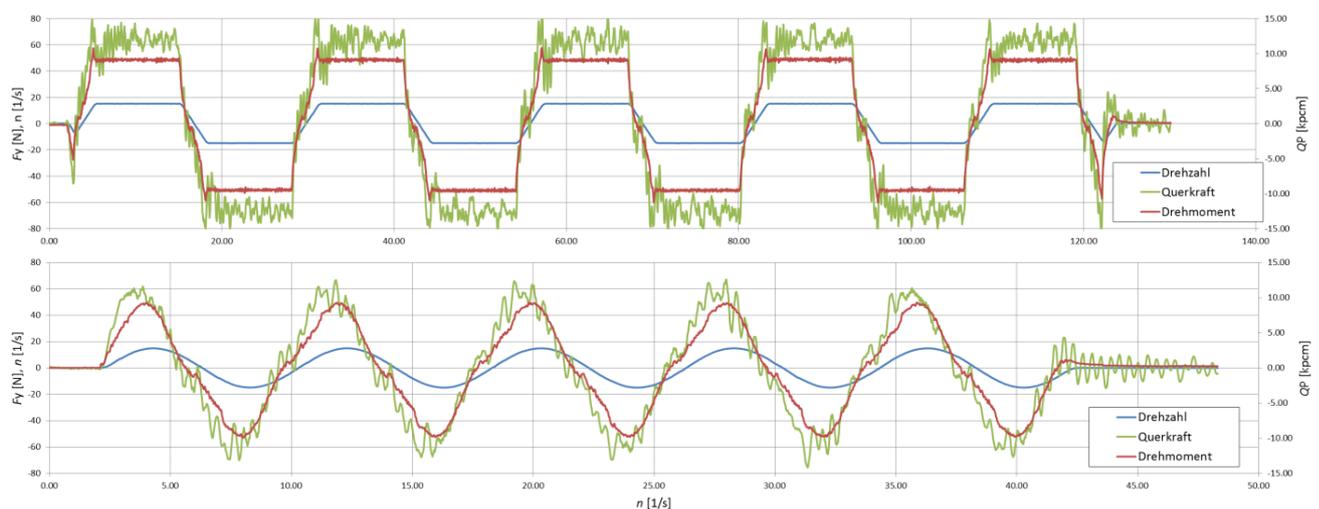
Der Einfluss der Drehzahländerungsrate/-geschwindigkeit auf den Hysterese-Effekt der Querkraft wurde mit Orientierung an real existierende Änderungsraten QRAs der Großausführung von bspw. Schottel [39] oder Jastram [40], 8 s für kleine Anlagen und bis zu 16 s für große Anlagen, unter-

sucht. Es wurden Drehzahländerungsraten im Modell bei linearer Änderung der Drehzahl von  $n = \pm 15$  1/s von 24 s, 12 s, 6 s, 4 s und 3 s und bei sinusförmiger Änderungen der Periodendauern von 48 s, 24 s, 12 s, 8 s, 6 s und 4 s untersucht.

### Form der Drehzahlvariation

In den instationären Messungen wurden lineare und sinusförmige auf- und absteigende Drehzahländerungsraten berücksichtigt. Bei den linearen Drehzahländerungen wurde zwischen zu- und abnehmender bzw. zwischen ab- und zunehmender Drehzahl die Drehzahl für einige Sekunden konstant gelassen, damit der zeitliche Verlauf der Querkraft hin zum stationären Wert miterfasst werden konnte.

Die Diagramme in Abbildung 24 zeigen die typischen zeitlichen Verläufe der Messgrößen während der instationären Messungen, oben – linear, unten - sinusförmig.



**Abbildung 24: Zeitliche Verläufe der instationären Drehzahländerungen**

### Tiefgang

Der Einfluss der Tauchtiefe und der Ventilation auf den Wirkungsgrad der QRA wurde in der Regel für drei Tiefgänge

- Tiefgang  $T_1$ : 325.0 mm (Design)
- Tiefgang  $T_2$ : 232.5 mm (Mitte zwischen  $T_1$  und  $T_3$ )
- Tiefgang  $T_3$ : 140.0 mm (Mitte Querstrahler)

untersucht. Für die Konfiguration M1695 wurden die Kräfte für die beiden zusätzlichen Tiefgänge

- Tiefgang  $T_4$ : 183.3 mm und
- Tiefgang  $T_5$ : 278.5 mm

gemessen, um den Beginn der Ventilation und deren Einfluss auf die erzeugten Querkräfte detaillierter zu betrachten.

### Tunneldurchmesser

Die Tunneldurchmesser wurden mit der Auswahl der Vorschiffsvarianten definiert. Der Einfluss auf den Hysterese-Effekt der Querkraft bei instationären Drehzahländerungen ist auch hier von Interesse, bzw. ob sich die Strömung im QRA-Tunnel der Drehzahländerung schneller bei kleinen oder bei großen Durchmessern anpasst.

### Breite des Vorschiffs/Länge der QRA

Die Variation der Länge der QRA wurde durch unterschiedliche breite Vorschiffe realisiert. Es wurden die QRA-Längen

- $L_1 = 262.4 \text{ mm}$  ( $L_1/D_2 = 1.75$ ,  $L_1/D_3 = 2.62$ ,  $L_1/D_1 = 1.40$ )
- $L_2 = 385.6 \text{ mm}$  ( $L_2/D_2 = 2.57$ ,  $L_2/D_3 = 3.86$ ,  $L_2/D_1 = 2.05$ )
- $L_3 = 512.8 \text{ mm}$  ( $L_3/D_2 = 3.41$ ,  $L_3/D_3 = 5.13$ ,  $L_3/D_1 = 2.72$ )

mit den entsprechenden Längen/Durchmesser-Verhältnissen vorbereitet. Auch hier war die Untersuchung des Einflusses auf den Hysterese-Effekt bei instationären Drehzahländerungen das vornehmliche Ziel.

### Krängungswinkel

Die Untersuchung von Asymmetrien in der instationären Querkraftentwicklung der QRA in Verbindung mit Lufteinbruch durch Krängung des Schiffes im Seegang war Gegenstand dieser Variationen. Krängungswinkel von  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  und  $10^\circ$  wurden definiert.

### Versuchsergebnisse

Die umfangreichen Versuche mit den beschriebenen Variationen wurden hinsichtlich der Querkraft am Bugstrahlruder ausgewertet. Eine Auswertung des Leistungsbedarfs war nicht Gegenstand der Zielstellung und wurde deshalb nicht vorgenommen, kann aber mit dem gemessenen Drehmoment und der Drehzahl prinzipiell durchgeführt werden. Es werden im Folgenden nur die wesentlichsten Ergebnisse diskutiert. Zu weiterführenden Details wird auf den Teilbericht [41] verwiesen.

Die stationären Messungen dienen dem Bezug und der Quantifizierung des instationären Hysterese-Effekts auf den stationären Zustand. Zudem sollte der Einfluss der geometrischen Parameter von den dynamischen unterschieden werden. Instationäre Messungen wurden unter Variation der geometrischen Randbedingungen, die auch bei den stationären Messungen berücksichtigt wurden, und den dynamischen Parametern

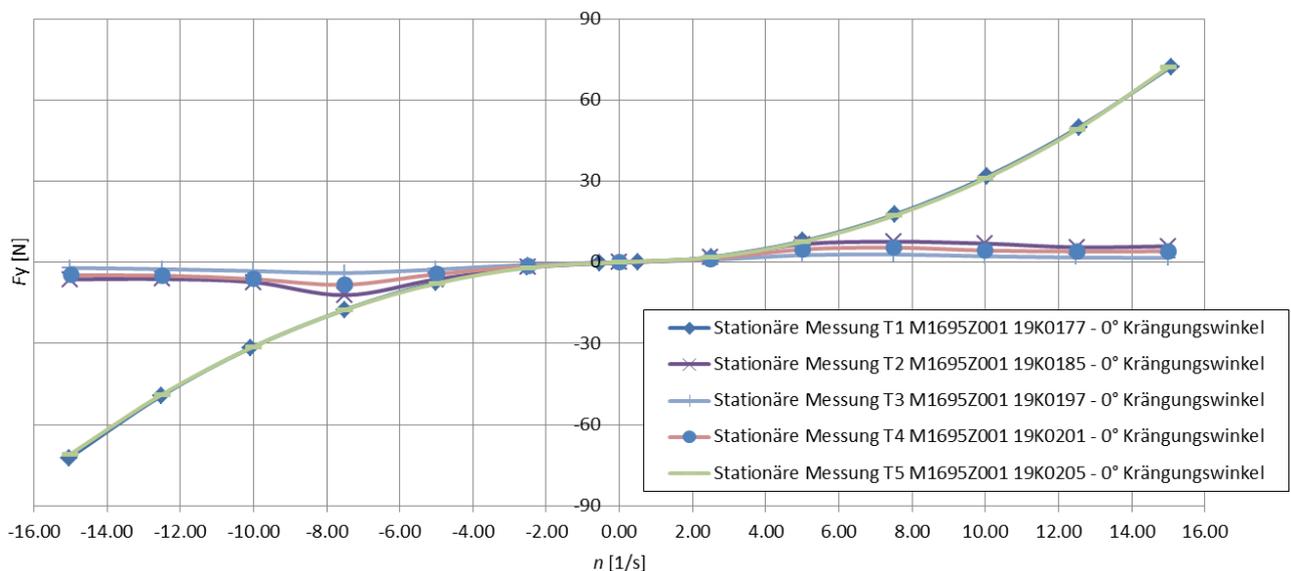
- Maximale/Minimale Drehzahl
- Drehzahländerungsgeschwindigkeit
- Form der Drehzahlvariation (sinusförmig, linear)

durchgeführt.

## Stationäre Einflüsse

### Tiefgang

Der Einfluss des Tiefgangs auf die Querkraft wurde für alle drei Vorschiffsvarianten und für die beiden QRA-Durchmesser untersucht. In allen Fällen war ein plötzlicher Abfall der Querkraft für  $T_2$  und  $T_3$ , bei denen Ventilation eintritt, zu verzeichnen. Der plötzliche Abfall der Querkraft ist genau so auch in der Literatur belegt [42], [43]. Für Vorschiffsvariante M1695Z001 wurden zusätzlich die beiden Tiefgänge  $T_4$  und  $T_5$  untersucht. Bei  $T_5$ , der zwischen  $T_1$  und  $T_2$  liegt, tritt, im Gegensatz zu  $T_4$ , der zwischen  $T_2$  und  $T_3$  liegt, noch keine Ventilation auf und die Querkraft entspricht der von  $T_1$ , Abbildung 25.



**Abbildung 25: Stationäre Messungen, Tiefgangsvariation, M1695Z001**

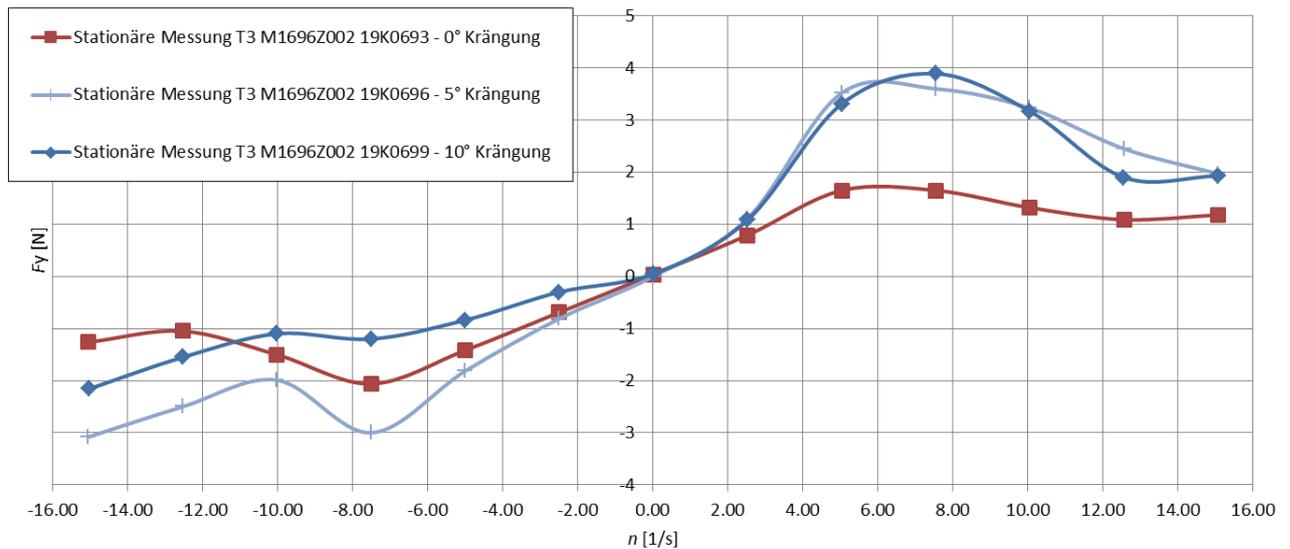
### Krängungswinkel

Der Einfluss der Krängungswinkel auf die Querkraft bei  $T_3$  von M1696Z002 ist in Abbildung 26 dargestellt.

Es ergeben sich asymmetrische Querkraftverläufe über die Drehzahl, die auch bei  $T_2$  zu verzeichnen sind. Bei diesen Tiefgängen tritt bei Krängungswinkeln von  $10^\circ$  beidseitige oder einseitige Ventilation ein.

### Länge des Querstrahlruders/ Breite des Vorschiffs

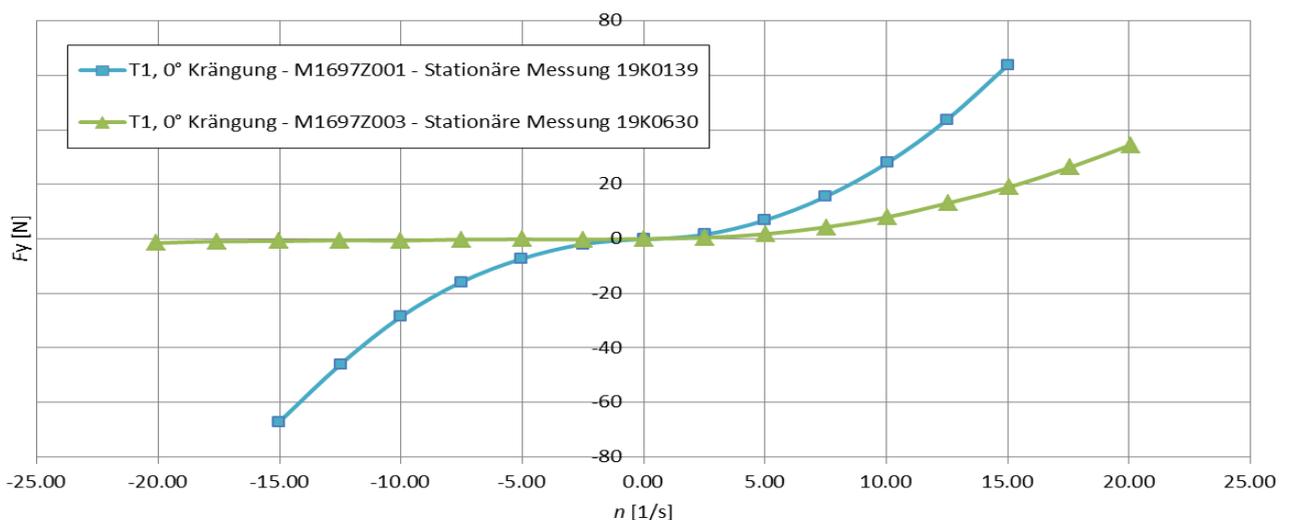
Die drehzahlabhängigen Querkräfte bei Variation der Vorschiffsbreite zeigen eine leichte Reduzierung der Querkraft mit Anstieg der Vorschiffsbreite/Länge des Querstrahlruders.



**Abbildung 26: Stationäre Messung, Variation des Krängungswinkels, T<sub>3</sub>, M1696Z002**

Durchmesser des Querstrahlruders

Der Einfluss des Durchmessers der QRA ist in Abbildung 27 illustriert. Für die untersuchten Konfigurationen für M1697 zeigt sich ein starker Abfall der Querkraft für den kleinsten Querstrahldurchmesser  $D_3$  (M1697Z003) gegenüber dem größten QRA-Durchmesser  $D_1$  (M1697Z001). Für den  $D_1$  ist auch eine Asymmetrie in der Querkraftentwicklung zwischen Backbord und Steuerbord zu erkennen. Beide Phänomene sind auf die große relative Versperrung durch die Gondel und den Schaft im Tunnel zurückzuführen. Zur weiteren Erklärung sei auf den CFD-Bericht und die Masterarbeit von Emilie Schmidt (Titel: Einfluss der Versperrung in einem Querstrahler auf den Hysteresse-Effekt der Querkraft bei Lastwechseln, TUB, 2019) verwiesen, in der der Einfluss der Versperrung auf die Querkraftentwicklung untersucht worden ist.



**Abbildung 27: Einfluss des Durchmessers, M1697, T1,  $\varphi = 0^\circ$**

Auch CFD Berechnungen bestätigen den Effekt der ungleichförmigen Propellerbelastung. Dabei zeigte sich, dass bei dem Vorschiff M1696 kein ablösefreier Einlauf gewährleistet werden konnte, da der Einlaufradius zu gering ist. In Abbildung 28 sind die Kräfteverläufe (hier relevant:  $F_p$  – Pro-

pellerkraft,  $F_s$  –Kraft der Schiffsgeometrie,  $F_t$  - Gesamtquerkraft) in y-Richtung für den Fall M1696,  $T_1$ ,  $D_3$  und  $\varphi = 0^\circ$  dargestellt. Es ist zu erkennen das  $F_t$  kleiner als  $F_p$  ausfällt, was aus dem negativen Effekt der Schiffsgeometrie bzw. der Versperrung resultiert. [A3]

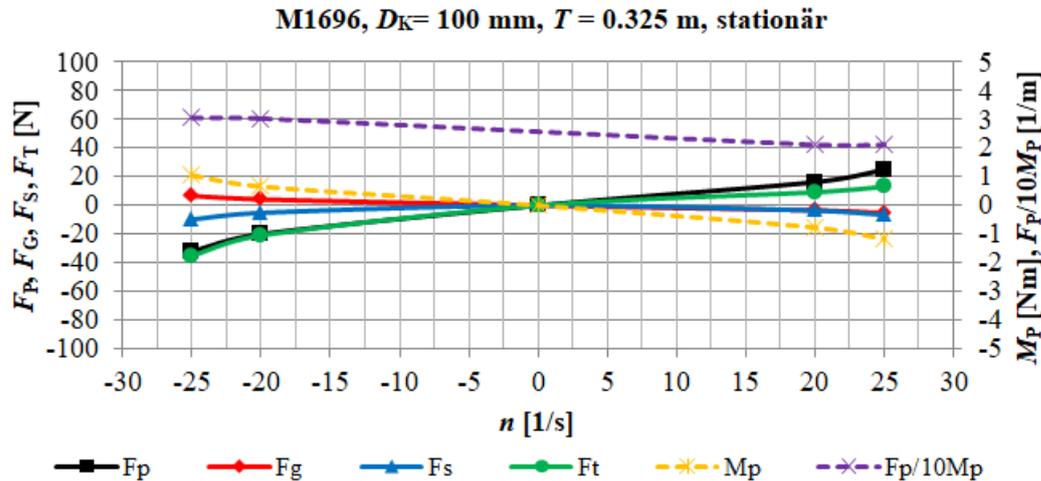


Abbildung 28: Kraftverläufe, M1696, T1,  $D_3$  und  $\varphi = 0^\circ$

### Instationäre Einflüsse

#### Eigenschwingungen des Messsystems

Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse fällt auf, dass in der Querkraft bei den instationären Lastwechseln stark höherfrequente Kraftschwingungen die Kraftänderungen aus den Lastwechseln überlagern. Die Ursache der höherfrequenten Kraftschwingungen liegt im Versuchsaufbau. Aus diesem Grunde sind die Eigenfrequenzen für den Messaufbau durch ‚Anstoßversuche‘ und einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) bestimmt worden. In Abbildung 29 ist das beispielhafte Energiespektrum durch eine FFT eines solchen Anstoßversuches dargestellt.

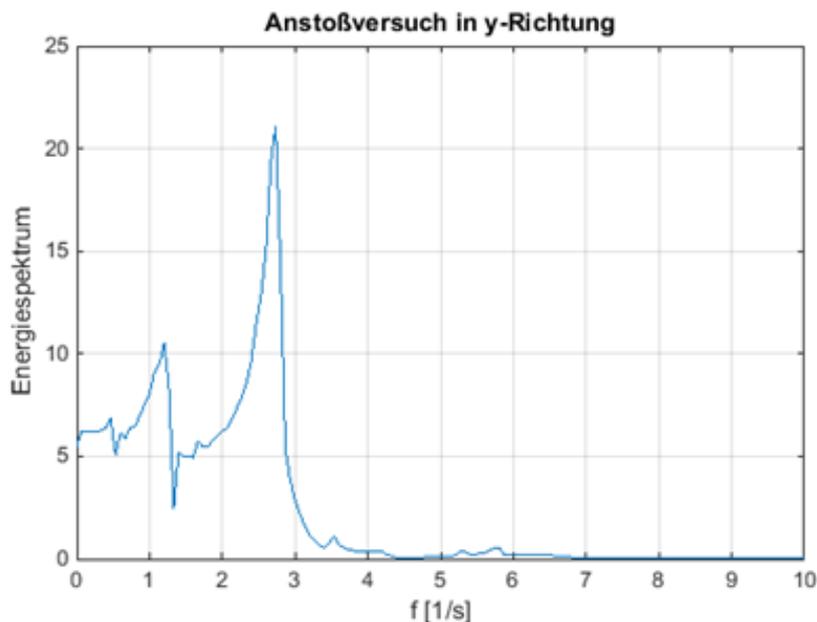
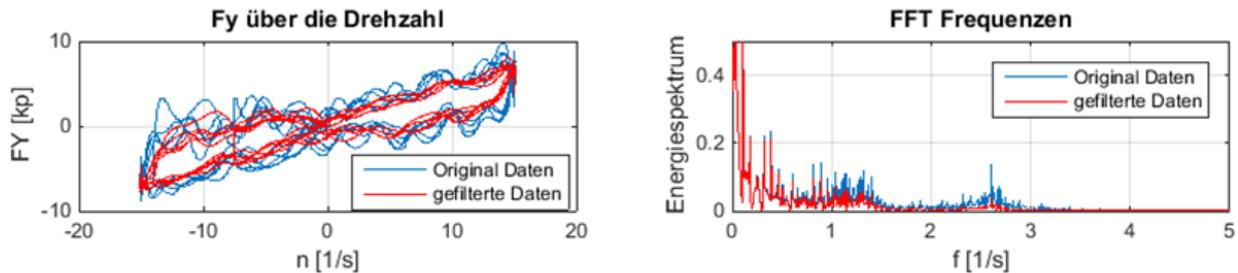


Abbildung 29: Beispielhaftes Energiespektrum aus FFT eines Anstoßversuchs des Messaufbaus

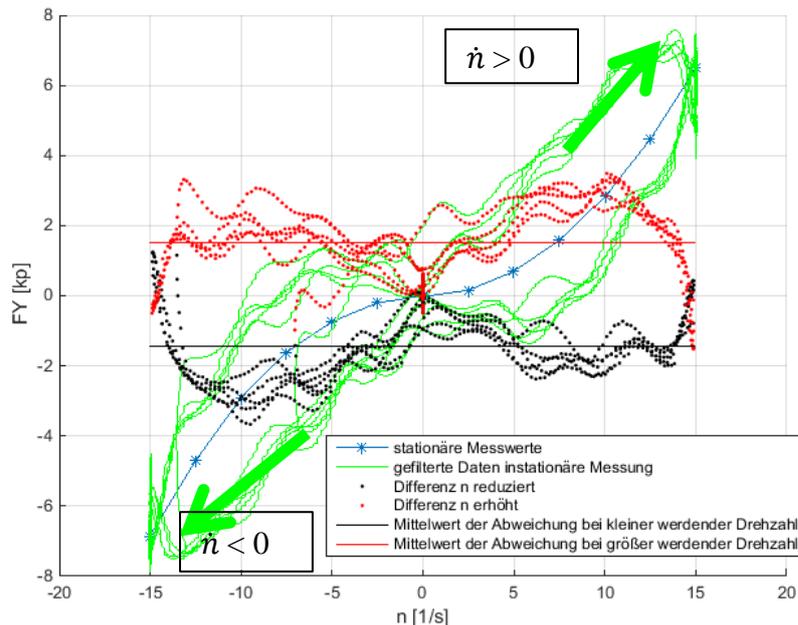
Um den Einfluss der Eigenschwingungen des Messsystems auf die Ergebnisse der Versuche zu reduzieren, wurden auf Basis der Ergebnisse der Anstoßversuche die Daten vor der Analyse durch ein Tiefpassfilter (Butterworth-Filter 1. Ordnung) mit einer Grenzfrequenz von 0.8 Hz gefiltert. In Abbildung 30 ist ein Beispielmessdatensatz (Querkraft  $F_y$  über Drehzahl des Bugstrahlers  $n$ ) für eine lineare Drehzahländerungsrate mit und ohne Tiefpass-Filter dargestellt (links). Rechts ist die entsprechende FFT-Analyse dargestellt. Die Eigenfrequenzen liegen oberhalb der Lastvariationsfrequenzen und können gut durch das Filtern reduziert werden.



**Abbildung 30: Beispielmessdatensatz von M1697Z001, T1,  $\varphi = 0^\circ$**

Bestimmung der mittleren Abweichung zwischen stationärer und dynamischer Messung

Die gefilterten Daten wurden verwendet, um die Abweichung der dynamischen Versuche von den stationären zu bestimmen. Dafür wurde zunächst die stationäre Drehzahl/Querkraft-Kurve mit einem Polynom 5. Grades approximiert. Anschließend wurden für die dynamischen Drehzahländerungen die Differenzen zwischen stationären und instationären Messungen für  $\dot{n} > 0$  und  $\dot{n} < 0$  separat bestimmt und der jeweilige Mittelwert über eine Drehzahländerung von  $\mp 14.9$  1/s auf  $\pm 14.9$  1/s berechnet. Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Auswerteschritte für die M1697Z001,  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$  mit linearer Drehzahländerungsrate im Zeitraum von 3s im Modell (12 s in der Großausführung). Die dynamische Kraft läuft der statischen also immer bei gleicher Drehzahl ein Stück voraus. Ursache hierfür wird die Geschwindigkeit im Querstrahler sein, die sich im dynamischen Verändern der Drehzahl nie stationär zur entsprechenden Drehzahl ausbilden kann. Wird die Drehzahl von  $n = -15$  1/s auf  $n = +15$  1/s erhöht folgt die Querkraft dem oberen Zweig. Die beiden grünen Pfeile sollen versuchen dies im Diagramm zu verdeutlichen.



**Abbildung 31: M1697Z001, T1,  $\varphi = 0^\circ$  mit einer linearen Drehzahländerungsrate von 3s**

### Einfluss der Form der Drehzahlvariation (sinusförmig, linear) auf den Hystereseeffekt

Es wurden lineare als auch sinusförmige Drehzahländerungen mit verschiedenen Drehzahländerungsraten bzw. Schwingungsperioden durchgeführt. Direkt vergleichbar in der Untersuchungsmatrix wären jeweils  $T_P = 48\text{s}$  Periodendauer in der sinusförmigen Drehzahländerung, was hier einer Zeitdauer der linearen Änderung von  $t_{\text{linear}} = 24\text{ s}$  für eine lineare Drehzahländerung von  $n = \pm 15\text{ 1/s}$  auf  $n = \pm 15\text{ 1/s}$  entspricht. Analoges gilt ebenso für  $T_P = 24\text{ s}$  mit  $t_{\text{linear}} = 12\text{ s}$ ,  $T_P = 12\text{ s}$  mit  $t_{\text{linear}} = 6\text{ s}$ ,  $T_P = 8\text{ s}$  mit  $t_{\text{linear}} = 4\text{ s}$  und  $T_P = 6\text{ s}$  mit  $t_{\text{linear}} = 3\text{ s}$ .

Als Vergleich werden für M1697Z001,  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$  verschiedene Drehzahländerungsgeschwindigkeiten herangezogen. Die mittleren Abweichungen der Querkraft für die linearen und sinusförmigen Drehzahländerungen zur stationären Messung sind in Tabelle 7 aufgetragen.

**Tabelle 7: M1697Z001,  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft für die linearen und sinusförmigen Drehzahländerungen durch Hystereseeffekt**

Konfiguration	Drehzahländerung von $n = \mp 15.1\text{ 1/s}$ auf $n = \pm 15\text{ 1/s}$	Mittlere Abweichung Linear $F_Y$ [N]	In % vom Maximalwert ( $n = 15\text{ 1/s}$ )	Mittlere Abweichung Sinusförmig $F_Y$ [N]	In % vom Maximalwert ( $n = 15\text{ 1/s}$ )
$T_1, \varphi = 0^\circ$	$T_P = 6\text{ s}; t_{\text{linear}} = 3\text{ s}$	14.55	21.61	20.54	30.50
„	$T_P = 8\text{ s}; t_{\text{linear}} = 4\text{ s}$	13.99	20.78	13.24	19.66
„	$T_P = 12\text{ s}; t_{\text{linear}} = 6\text{ s}$	9.49	14.09	7.20	10.69
„	$T_P = 24\text{ s}; t_{\text{linear}} = 12\text{ s}$	4.80	7.13	3.19	4.74
„	$T_P = 48\text{ s}; t_{\text{linear}} = 24\text{ s}$	2.20	3.27	1.64	2.44

### Einfluss der Drehzahländerungsgeschwindigkeit auf den Hystereseeffekt

Der Einfluss der Drehzahländerungsgeschwindigkeit ist ebenfalls in Tabelle 7 dargestellt. Der Hysterese-Effekt kann bei für die Großausführung typischen Drehzahländerungsraten 20 – 30% der maximalen Querkraft ausmachen. Eine weitere Analyse zum Einfluss der Drehzahländerungsrate wird in Tabelle 8 für die Konfiguration M1696Z002,  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$  gezeigt. Die Hysterese der Querkraft ist hierbei viel kleiner als bei M1697Z001 und macht in der Spitze nur noch ca. 5% der maximalen Gesamtquerkraft aus.

**Tabelle 8: M1696Z002,  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft für die linearen Drehzahländerungen durch Hystereseeffekt**

Konfiguration	Drehzahländerung von $n = \mp 15\text{ 1/s}$ auf $n = \pm 15\text{ 1/s}$	Mittlere Abweichung Linear $F_Y$ [N]	In % vom Maximalwert ( $n = 15\text{ 1/s}$ )
$T_1, \varphi = 0^\circ$	$t_{\text{linear}} = 3\text{ s}$	3.84	5.84
„	$t_{\text{linear}} = 4\text{ s}$	3.35	5.10
„	$t_{\text{linear}} = 6\text{ s}$	2.64	4.02
„	$t_{\text{linear}} = 12\text{ s}$	2.00	3.04
„	$t_{\text{linear}} = 24\text{ s}$	1.20	1.83

### Einfluss der maximalen/minimalen Drehzahl auf den Hystereseeffekt

Für die Konfiguration M1697Z001 sind verschiedene lineare Drehzahländerungen mit unterschiedlichen maximalen Drehzahlen untersucht worden. Die maximale Drehzahl wurde von  $n = 5\text{ 1/s}$  über  $n = 10\text{ 1/s}$  auf  $n = 15\text{ 1/s}$  variiert und dynamische Daten sind zu Vergleichszwecken nur im Bereich

$\pm 5$  1/s ausgewertet. Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse für eine lineare Drehzahländerung innerhalb von 24 s.

**Tabelle 9: M1697Z001, T1,  $\varphi = 0^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft im Bereich  $\pm 5$  1/s durch Hystereseeffekt für die Variation der maximalen Drehzahl bei linearer Drehzahländerung in 24 s**

Konfiguration	Mittlere Abweichung Linear $F_Y$ [N]	In % vom Maximalwert ( $n = 15$ 1/s)
$T_1, \varphi = 0^\circ, n = \pm 15$ 1/s	4.18	6.21
$T_1, \varphi = 0^\circ, n = \pm 10$ 1/s	3.77	5.60
$T_1, \varphi = 0^\circ, n = \pm 5$ 1/s	3.90	5.79

### Tiefgang

Wie in den stationären Messungen beschrieben, sind für alle Vorschiffsvarianten Tiefgangsänderungen untersucht worden. Bei den ausgewählten Tiefgängen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  kommt es bei allen untersuchten Vorschiffsvarianten bereits bei  $T_2$  zur Ventilation, was einen signifikanten Einbruch der Querkraft über den gesamten Drehzahlbereich zur Folge hat. Ein Vergleich der dynamischen Effekte ist daher für diese Tiefgänge nicht sinnvoll. Für Variante M1695Z001 jedoch wurden zwei weitere Tiefgänge,  $T_4$  und  $T_5$  untersucht. Für  $T_5$  findet, wie bei  $T_1$ , kein Lufteinbruch statt. Dieser Tiefgang kann daher für eine Untersuchung des Einflusses des Tiefgangs auf dynamische Hystereseeffekte der Querkraft bei Drehzahländerung hinzugezogen werden. Tabelle 10 zeigt den Unterschied der beiden Tiefgänge anhand der mittleren Abweichung der Querkraft für die lineare Drehzahländerung durch den Hystereseeffekt.

**Tabelle 10: M1695Z001, T1 und T5,  $\varphi = 0^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft für die linearen Drehzahländerungen durch Hystereseeffekt**

Konfiguration	Drehzahländerung von $n = \mp 15$ 1/s auf $n = \pm 15$ 1/s	Mittlere Abweichung $T_1$ $F_Y$ [N]	In % vom Maximalwert ( $n = 15$ 1/s)	Mittlere Abweichung $T_5$ $F_Y$ [N]	In % vom Maximalwert ( $n = 15$ 1/s)
$\varphi = 0^\circ$	$t_{\text{linear}} = 3$ s	2.33	3.22	4.81	6.67
„	$t_{\text{linear}} = 4$ s	0.41	0.57	3.32	4.60
„	$t_{\text{linear}} = 6$ s	1.71	2.37	2.25	3.12
„	$t_{\text{linear}} = 12$ s	0.81	1.12	1.03	1.43
„	$t_{\text{linear}} = 24$ s	0.59	0.82	0.47	0.65

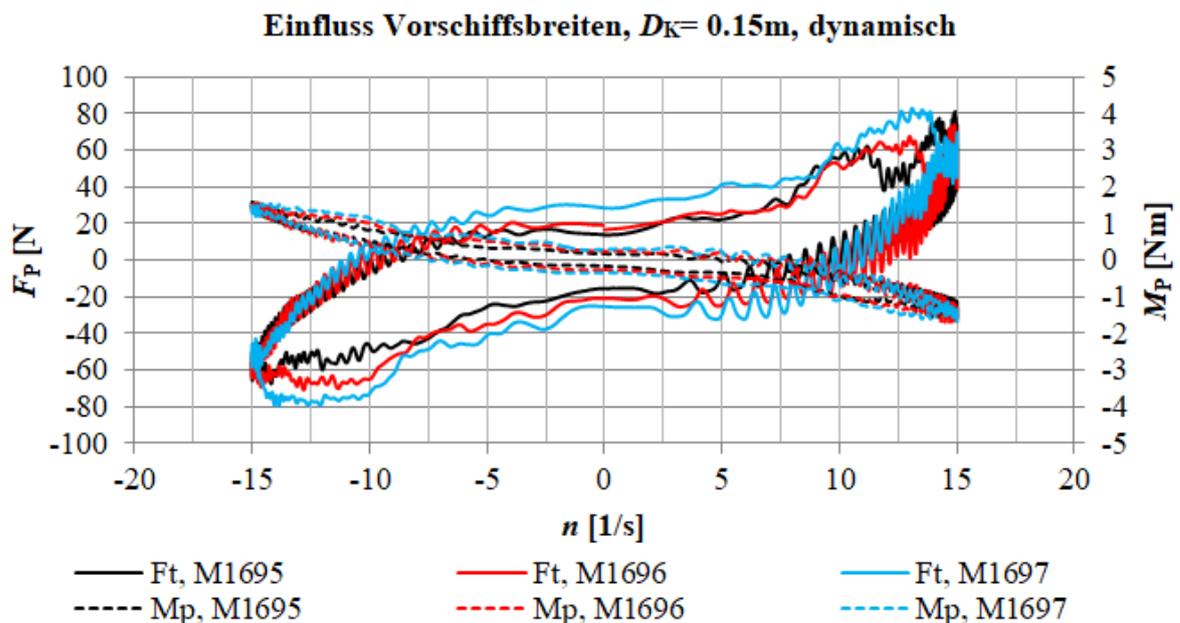
### Länge des Querstrahlruders/ Breite des Vorschiffs

Der Einfluss der QRA-Länge auf den Hystereseeffekt ist groß und wird in Tabelle 11 anhand der Messungen von M1695Z001 und M1697Z001 bei  $T_1, \varphi = 0$  gezeigt.

**Tabelle 11:: M1695Z001 und M1697Z001 bei  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft für die linearen Drehzahländerungen durch Hystereseeffekt**

Konfiguration	Drehzahl- änderung von $n = \mp 15$ 1/s auf $n = \pm 15$ 1/s	Mittlere Abweichung M1695Z001 $F_Y$ [N]	In % vom Maximal- wert ( $n = 15$ 1/s)	Mittlere Abweichung M1697Z001 $F_Y$ [N]	In % vom Maximal- wert ( $n = 15$ 1/s)
$T_1, \varphi = 0^\circ$	$t_{\text{linear}} = 3$ s	2.33	3.22	14.55	21.61
„	$t_{\text{linear}} = 4$ s	0.41	0.57	13.99	20.78
„	$t_{\text{linear}} = 6$ s	1.71	2.37	9.49	14.09
„	$t_{\text{linear}} = 12$ s	0.81	1.12	4.80	7.13
„	$t_{\text{linear}} = 24$ s	0.59	0.82	2.20	3.27

Auch die CFD-Berechnungen zeigen den Einfluss der Tunnellänge auf den Hysterese-Effekt. In Abbildung 32 ist der dynamische Querkraftverlauf ( $F_t$ ) über die Drehzahl der drei Modelle (M1695Z002, M1696Z002, M1697Z002) bei  $T_1$  und  $\varphi = 0$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Hystereseeffekt mit steigender Länge der QRA/ Breite des Vorschiffes steigt. [A3]



**Abbildung 32: Einfluss der Tunnellänge  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$**

Durchmesser des Querstrahlruders

Die Konfigurationen M1697Z001 und M1697Z003 bei  $T_1$  für  $\varphi = 0$  wurden verglichen. Wie bereits in den stationären Einflüssen beschrieben, ist für M1697Z003  $T_1$  ein asymmetrisches Querkraftverhalten zu erkennen, welches auf die Versperrung der Getriebegondel und des Antriebsschafts im QRA-Tunnel zurückzuführen ist. Auch ist die maximale Querkraft bei  $n = 15$  1/s nur ca. 25 % der maximalen Querkraft für Konfiguration M1697Z001,  $T_1$  für  $\varphi = 0$ .

Tabelle 12 zeigt den Unterschied der beiden Tunneldurchmesser anhand der mittleren Abweichung der Querkraft für die lineare Drehzahländerung durch den Hystereseeffekt.

**Tabelle 12: M1697Z003,  $T_1$  und M1697Z001,  $T_1$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft für die linearen Drehzahländerungen durch Hystereseeffekt**

Konfiguration	Drehzahl- änderung von $n = \mp 15$ 1/s auf $n = \pm 15$ 1/s	Mittlere Abweichung M1697Z003 $F_Y$ [N]	In % vom Maximal- wert ( $n = 15$ 1/s)	Mittlere Abweichung M1697Z001 $F_Y$ [N]	In % vom Maximal- wert ( $n = 15$ 1/s)
$T_1, \varphi = 0^\circ$	$t_{\text{linear}} = 3$ s	1.20	6.34	14.55	21.61
„	$t_{\text{linear}} = 4$ s	1.10	5.81	13.99	20.78
„	$t_{\text{linear}} = 6$ s	0.95	5.02	9.49	14.09
„	$t_{\text{linear}} = 12$ s	0.86	4.54	4.80	7.13
„	$t_{\text{linear}} = 24$ s	0.67	3.54	2.20	3.27

### Krängungswinkel

Der Krängungswinkel hat auf die Querkraft nur dann einen signifikanten Einfluss, wenn durch die Krängung Ventilation auf einer Seite der QRA entsteht. Sind beide Öffnungen getaucht, wie es bei  $T_1$  bei jeder Konfiguration der Fall ist, sind keine Unterschiede herauszumessen.

Findet bei den Tiefgängen  $T_2$  und  $T_3$  Ventilation an einer QRA-Öffnung statt, so ist das Querkraftverhalten asymmetrisch. Beispielhaft werden für die Konfiguration M1697Z001,  $T_2$  die Krängungswinkel  $\varphi = 0^\circ$  und  $10^\circ$  in Tabelle 13 aufgetragen.

**Tabelle 13: M1697Z001,  $T_2$ ,  $\varphi = 0^\circ$  und  $10^\circ$ , mittlere Abweichungen der Querkraft für die linearen Drehzahländerungen durch Hystereseeffekt**

Konfiguration	Drehzahl- änderung von $n = \mp 15$ 1/s auf $n = \pm 15$ 1/s	Mittlere Abweichung $\varphi = 0^\circ$ $F_Y$ [N]	In % vom Maximal- wert ( $n = 15$ 1/s)	Mittlere Abweichung $\varphi = 10^\circ$ $F_Y$ [N]	In % vom Maximal- wert ( $n = 15$ 1/s)
$T_2$	$t_{\text{linear}} = 3$ s	0.96	9.11	6.82	24.38
„	$t_{\text{linear}} = 4$ s	0.60	5.70	5.30	18.95
„	$t_{\text{linear}} = 6$ s	0.83	7.88	2.84	10.15
„	$t_{\text{linear}} = 12$ s	0.26	2.47	2.72	9.72
„	$t_{\text{linear}} = 24$ s	0.05	0.47	2.81	10.05

### • Großausführungsmessungen

Ursprünglich war die Durchführung von Großausführungsmessungen von Voith in Zusammenarbeit mit der Universität Rostock mit Unterstützung der SVA für die Ermittlung aller relevanten Daten zur Einstellung eines DP-Regelalgorithmus und der Validierung von Modellversuchs- bzw. Simulationsergebnissen geplant. Es sollten genauere Betrachtungen des Maßstabeffekts stattfinden, wobei nicht nur das Verhalten (Bewegungen, Beschleunigungen, Steuerorgane) des Schiffes betrachtet werden sollte, sondern auch unter welchen Umweltbedingungen das Schiff reagiert. Dafür sollten in Vorbereitung der Großausführungsmessungen das vorhandene Messwerterfassungssystem um die Messung von Seegang (Seegangsboje) und Strömung (Strömungsboje) erweitert werden.

Die Messtechnik und die Schnittstellen zu den Partnern für die Großausführungsmessungen sollten an Land erprobt und falls nötig modifiziert werden. Die Messtechnik zur Aufnahme der Umweltbedingungen (Wind, Seegang) sollte in einem See in der Nähe der SVA getestet werden.

Ein erforderliches Zeitfenster für Großausführungsmessungen bei betriebenen Schiffen ist naturgemäß sehr beschränkt. Daher sollten die konzentrierte Vorbereitung der Messungen und das Bereithalten von redundanter Messtechnik während der Messungen von Seiten der SVA gewährleistet sein.

Letztendlich sollten die Ergebnisse aller Arbeitspunkte analysiert und für die Auswertung entsprechend aufbereitet werden. Es sollte ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt und Perspektiven für die Anwendung und die zukünftige Erweiterung des entwickelten Systems aufgezeigt werden.

Ein Basissystem für Großausführungsmessungen war in der SVA bereits aus dem FuE-Vorhaben 03SX351B [44] vorhanden. Dort sollten für die Einstellung der DP-Regelung in der Großausführung die notwendigen Daten entweder von den einzelnen Steuerorganen oder von der Brücke des Schiffes abgegriffen werden. Die Daten der globalen Schiffsposition und -bewegungen in allen 6 Freiheitsgraden werden für das Regelungssystem eingesammelt und diesem für die Regelung zur Verfügung gestellt. Die Windgeschwindigkeit, als einzige Umweltgröße, wird direkt gemessen.

Die Messkomponenten wurden entsprechend den Anforderungen konfiguriert und für Großausführungsmessungen vorbereitet.

Die für die Großausführungsmessungen eingestellten Parameter, sowie die erweiterten Algorithmen des DP-Systems sollten im Vorfeld der geplanten Großversuche im Modellversuch in der Schlepprinne der SVA überprüft werden. Dazu dienen die Langzeit DP-Versuche am Modell der „Edda Fram“ sowie die Erprobung der Systeme im Laborversuch in der Schlepprinne der SVA mit einem Modell des für die Großversuchsmessungen vorgesehenen Schleppers (CRT) M1742.

Da es innerhalb des geplanten Zeitraums seitens der Reederei nicht möglich war, den Schlepper trotz zweimaliger Verlängerung der Laufzeit des FuE-Vorhabens für die Großversuchsmessungen zur Verfügung zu stellen, wurde in Einvernehmen mit dem Projektträger vereinbart, diesen Arbeitspunkt aus dem Arbeitsplan herauszunehmen und das Vorhaben ohne diesen Punkt abzuschließen.

#### • **Bewertung der Ergebnisse, abschließende Bemerkungen**

Nach Abschluss sämtlicher Laboruntersuchungen und der CFD-Simulationen erfolgte eine eingehende Analyse der Ergebnisse. Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen bezüglich der Querkraft eines Bugstrahlruders ableiten.

Stationäre Einflüsse:

1. Zum Einfluss des Tiefgangs auf die Querkraft einer QRA zeigte sich, dass mit Vergrößerung der Vorschiffsbreite im QRA-Bereich eine Ventilation erst bei geringerem Tiefgang eintritt.
2. Eine Vergrößerung der Vorschiffsbreite im QRA-Bereich bedingt eine leichte Verringerung der zu erzeugenden Querkraft,
3. Einen entscheidenden Einfluss auf die Querkraft einer QRA hat der Tunneldurchmesser. Bei kleinem Tunneldurchmesser ist ein starker Abfall verbunden mit einer Asymmetrie zu verzeichnen, der durch die größere Versperrung durch die Gondel verursacht wird. Verstärkt wird der Abfall durch geringere Einlaufradien verbunden mit unerwünschter Ablösung der Strömung.

## Instationäre Einflüsse:

1. Prinzipiell ist bei Vergrößerung der Drehzahländerungsgeschwindigkeit durch den Hystereseeffekt ein deutlicher Querkraftabfall zu verzeichnen. Das kann sich bei schnellen Manövern, die kleine Schubumkehrzeiten erfordern, negativ auf den zu liefernden hohen Schub einer QRA auswirken. Eine Erhöhung der Querkraft kann hingegen mit einer sinusförmigen Drehzahländerung bei kleinerer Periodendauer erreicht werden.
2. Der Hystereseeffekt infolge instationärer Drehzahländerung kann für typische Änderungsraten 20 bis 30% ausmachen. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei mittlerer Breite im QRA-bereich und mittlerem Durchmesser die Hysterese wesentlich verringert werden kann.
3. Bei Drehzahländerungen hat die Tunnellänge einen entscheidenden Einfluss auf die Hysterese. Dieser Effekt steigt mit zunehmender Tunnellänge und kann bis über 20% vom Maximalwert ausmachen. Das konnte auch durch die CFD-Simulationen bestätigt werden.
4. Wie bei den stationären Einflüssen bedingt eine Reduzierung des Tunneldurchmessers ein asymmetrisches Querkraftverhalten. Dabei kann die maximale Querkraft gegenüber dem größeren Tunneldurchmesser um 25% geringer ausfallen.
5. Bei überlagerter Krängung, womit vor allem im Seegang zu rechnen ist, wird der Einfluss auf die Querkraft nur dann signifikant, wenn es zu Ventilation auf einer Seite der QRA kommt.

Die umfangreichen Ergebnisse lieferten einen wesentlichen Beitrag für das im Verbundvorhaben entwickelte DP0-System. Dabei wurde die Validierung numerischer Simulationen nach einer auf Querstrahlruder angepassten Frozen-Rotor-Methode vorgenommen, wobei zum Teil eine sehr gute Übereinstimmung zum Laborversuch erzielt wurde. Die guten bis sehr guten Übereinstimmungen des Simulationsverfahrens zum Experiment erlauben den zukünftigen Einsatz beim Entwurf und der Optimierung von Querstrahlruderanlagen. Dabei kann auf eine große Datenbank an Laborergebnissen und auf leistungsfähige Simulationsverfahren zurückgegriffen werden.

## II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Position	Gesamtvorkalkulation (€)	Gesamtnachkalkulation (€)
0831 Material	12.836,00	13.373,72
0823 FE-Fremdleistungen	0	0
0837 Personalkosten	260.538,00	269.543,27
0838 Reisekosten	2.193,00	1.056,92
0847 Abschreibungen auf vorhaben- spezifische Anlagen	3.749,00	0
0848 Abschreibungen auf sonstige genutzte Anlagen des FE-Bereichs	0	0
0850 sonstige unmittelbare Vorhabens- kosten	1.788,00	0
<b>0855 Summe</b> unmittelbare Vorhaben- kosten (Pos. 0813 – 0850)	281.104,00	283.973,91
0856 Kosten innerbetrieblicher Leistungen	0	0
0860 Verwaltungskosten	0	0
<b>0881 gesamte Selbstkosten des Vor- habens</b> (Summe Pos. 0855 - 0860)	281.104,00	283.973,91

### II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Durchführung von Versuchen zum dynamischen Positionieren mit Regelung und Allokation unter Berücksichtigung der signifikanten Umweltbedingungen Wind, Seegang und Strömung mit Integration eines Bugstrahlruders war und ist sehr anspruchsvoll und risikobehaftet. Der spezielle Ansatz der SVA bestand hierbei in der systematischen Untersuchung sämtlicher relevanter Einflussfaktoren auf die bereitzustellende Querkraft einer QRA für die weiteren vorhandenen Steuerorgane. Die Ergänzung dieser Untersuchungen durch zielgerichtete CFD-Simulationen sicherte die Bereitstellung einer breitangelegten Datenbasis, die unmittelbar in das im Verbundvorhaben entwickelte DP0-System einfließen konnte. Im Verlauf des Projektes wurden wesentliche Parameter ermittelt, die für den Einsatz eines DP-Systems in der Großausführung erforderlich sind. Gegenüber der ursprünglichen Planung konnten die zum Abschluss des Vorhabens geplanten Großversuche nicht mehr durchgeführt werden, da kein Zeitfenster seitens des Betreibers des geplanten Schleppers zur Verfügung gestellt werden konnte. Zum Abschluss des FuE-Vorhabens wurden alle Mess- und Entwicklungsergebnisse der SVA in ausführlichen Teilberichten dargelegt.

#### FuE-Teilberichte der SVA

- [A1] Steinwand, M.  
Messung der Wellendriftkräfte am Modell der „Edda Fram“  
Bericht 5051, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Potsdam, August 2019
  
- [A2] Steinwand, M.  
Messung der Querstrahlruderkräfte durch instationären Drehzahlvariation und Ventilation an modifizierten Vorschiffen der „Edda Fram“  
Bericht 4875, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Potsdam, September 2019
  
- [A3] Schomburg, E.  
CFD-Berechnungen zur Dynamik von Querstrahlrudern  
Bericht 4918, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Potsdam, Februar 2020

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die gewonnenen Ergebnisse werden von der SVA in Form von Know-how Transfer bei zahlreichen Industrieaufträgen genutzt. Der direkte Nutzen für die SVA ergibt sich durch die Akquirierung von Industrieaufträgen auf dem Gebiet der Untersuchungen von Offshore Support Vessels, Plattformen, Bestimmung der DP-Fähigkeit von Schiffen, experimentelle Durchführung von DP-Versuchen unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen Wind, Strömung und Seegang und Seegangsversuchen.

Die SVA Potsdam erzielt derzeit einen jährlichen Umsatz von ca. 1.3 Millionen EURO aus Industrieaufträgen. Dabei beinhalten Untersuchungen zum allgemeinen Manövrierverhalten, zur Kurshaltfähigkeit sowie der Auslegung und Optimierung von Rollstabilisierungssystemen bzw. DP-Systemen auch mit Berücksichtigung des Einflusses von Seegang und Wind bereits etwa 1/3 des Auftragsvolumens. Eine steigende Tendenz für die kommenden Jahre zeichnet sich bereits ab.

Ein wesentlicher Nutzen fällt beim Kunden (Werft, Designbüro, Hersteller von Düsenpropellern) an, der ein wettbewerbsfähigeres Produkt dem Reeder oder Schiffseigner anbieten kann, während der betriebswirtschaftliche Nutzen insgesamt dem Schiffsbetreiber zufällt. Positiv auf das Betriebsergebnis wirken sich auch die höhere Schiffssicherheit und die Vermeidung von Schäden und Ausfallzeiten bei Schiffen aus.

Indirekt ergibt sich ein Nutzen für die SVA durch die Verbesserung der Reputation und den Nachweis der notwendigen Kenntnisse auf dem Gebiet des dynamischen Positionierens, was dann wiederum zu Industrieaufträgen führt.

Zur weiteren Verwertung der Ergebnisse des FuE-Vorhabens sollen folgende Arbeiten in der SVA durchgeführt werden:

1. Anpassung und Einbindung der entwickelten Trapez-Kraftmesseinrichtung in das Messgerätesystem der SVA, Erarbeitung der entsprechenden Verfahrensanweisungen
2. Einbindung des CFD-Simulationstools für Querstrahlruderanlagen in das Dienstleistungsangebot der SVA
3. Anpassung und Einbindung des DP0-Systems für Labormessungen im Rahmen von DP-Messungen in der Schlepprinne der SVA
4. Erweiterung des SVA-Messequipment für DP-Messungen in der Großausführung

## **II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Derzeit können 10 Firmen benannt werden, die weltweit Positioniersysteme für Schiffe und Boote anbieten. Nach vorliegenden Informationen sind innerhalb der letzten Jahre keine wesentlichen Fortschritte bzw. Neuerungen auf dem Gebiet des dynamischen Positionierens von Schiffen und Plattformen mit Motionstabilisierung erreicht worden.

## II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Ausgewählte Ergebnisse des FuE-Vorhabens wurden in den folgenden Beiträgen veröffentlicht.

- [V1] Detlefsen, O.; Theilen, L.; Abdel-Maksoud, M.  
Static and Dynamic Analysis Methods of Position-Keeping Capability for Offshore Supply Vessels with Voith-Schneider Propellers  
Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE (7A-2017), June 2017
- [V2] Koschorrek, P., Siebert, C., Theilen, L., Detlefsen, O., Palm, M., Mach, K.-P. Steinwand, M., Jeinsch, T. Abdel-Maksoud M.  
Dynamic positioning with Voith Schneider Propeller: Experimental system validation with a model-scale offshore supply vessel  
22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR, Sept. 2017

## Literatur

- [1] Steinwand, M.  
SLOWMAN – Prognose quasistationärer Rumpfkkräfte anhand von Vergleichsschiffen, numerische Modellierung von Steuer- und Propulsionsorganen und Verifikation simulierter Manöver  
SVA Potsdam Bericht 3743, Potsdam, Januar 2011
- [2] Heinke, C.  
POSTHRUST, Thruster für dynamisches Positionieren  
Bericht Nr. 3865, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Dezember 2011
- [3] Heinke, C.  
Bestimmung der Kräfte und Momente auf das Unterwasserschiff über Anströmwinkel von 360°  
Bericht Nr. 4342, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Juni 2015
- [4] Heinke, C.  
Freifahrtversuche mit Voith Radial Propellern (VRP)  
Bericht Nr. 3768, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Juni 2011
- [5] Steinwand, M.  
Prognose quasistationärer Rumpfkkräfte anhand von Vergleichsschiffen, numerische Modellierung von Steuer- und Propulsionsorganen und Verifikation simulierter Manöver  
SVA Potsdam Bericht 3743, Potsdam, Januar 2011
- [6] Steinwand, M.  
Maßstabeffekte bei der Bestimmung des Manövrierverhaltens von Unterwasserfahrzeugen durch Modellversuche  
Abschlussbericht FuE-Vorhaben MANUV, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, 2009

- [7] Steinwand, M.  
Manoeuvrability of a Single Screw Ship with Pod  
Hydronav'2003, Gdansk, Poland, 2003
- [8] Mach, K.-P., Schulz, U., Steinwand, M.  
Unterwasserfahrzeuge - Identifikation des Bewegungsverhaltens  
STG-Sprechtage Manövrieren, Hamburg, 2005
- [9] Weede, H.  
Entwicklung eines Systems zur Bestimmung der Manöviereigenschaften seegehender Schiffe  
Abschlussbericht FuE-Vorhaben AiF 11598 B/1, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, 2000
- [10] Schroeder, G.  
Eine Einrichtung für Modellversuche an Propellern für Querstrahlruder  
Schiffbauforschung 23, 3/1984
- [11] n. n.  
Mehr Sicherheit in der Küstenschifffahrt bei geringeren Kosten!  
Schiffahrt und Technik 8/92
- [12] Schroeder, G.  
Versuche mit 3 Querstrahlruderpropellern im Kavitationskanal  
Bericht Nr. 1476, SVA Potsdam, 1983 (unveröffentlicht)
- [13] Schroeder, G.  
Versuche mit Leiteinrichtungen und Flügelendscheiben für Querstrahlruderpropeller im  
Kavitationskanal  
Bericht Nr. 1595, SVA Potsdam, 1986 (unveröffentlicht)
- [14] Heinke, H.-J.  
Vergleichende Geräuschmessungen an Querstrahlruderpropellern  
Bericht Nr. 1658, SVA Potsdam, 1987 (unveröffentlicht)
- [15] Nietzschmann, Th:  
Widerstands- und Propulsionsversuch mit dem Modell eines Arbeitsschiffes mit Voith-  
Schneider-Propellern  
SVA Bericht 3298, 2007 (unveröffentlicht)
- [16] Nietzschmann, Th.  
Propulsion tests with a model of a Cable laying Vessel with Voith-Schneider-Propeller  
SVA Bericht 3146, 2005 (unveröffentlicht)
- [17] Heinke, H.-J.  
Optimierung von hochbelasteten Flügeln für Vertikal-Achsen-Rotoren  
Schlussbericht FuE-Vorhaben, SVA Bericht 3227, 2006
- [18] Fröhlich, M.  
Roll Tests with the Model of a Motor Yacht with an active Controller of Voith-Schneider  
Propellers  
SVA Bericht 3275, 2006 (unveröffentlicht)

- [19] Fröhlich, M.  
Roll Damping Tests with the Model of an Offshore Platform Supply Vessel with an active Controller of a Voith-Schneider Propeller  
SVA Bericht 3474, 2008 (unveröffentlicht)
- [20] Steinwand, M.  
Manoeuvring Tests and Escort Force Measurements, Project: RAVE  
SVA Bericht 3788, 2011 (unveröffentlicht)
- [21] Beveridge, J. L.  
Design and Performance of Bow Thrusters  
Marine Technology, October 1972
- [22] Cody, S. E.  
An Experimental Study of the Response of Small Tunnel Thrusters to Triangular and Square Wave Inputs  
Thesis NAVAL postgraduate school, December 1992, Monterey
- [23] Healey, A. J., et al.  
Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles  
IEEE journal of oceanic engineering, Vol. 20, No. 4, October 1995
- [24] McLean, M. B.  
Dynamic Performance of Small Diameter Tunnel Thrusters  
Thesis NAVAL postgraduate school, March 1991, Monterey
- [25] Palm, M., Jürgens, D., Bendl, D.  
Numerical and Experimental Study on Ventilation for Azimuth Thrusters and Cycloidal Propellers  
Second International Symposium on Marine Propulsors, smp'11, Hamburg, June 2011
- [26] Koushan, K.  
Dynamics of Propeller Blade and Duct Loading on Ventilated Thrusters in Dynamic Positioning Mode  
Dynamic Positioning Conference, Houston, October 2007
- [27] Califano, A.  
Dynamic loads on marine propellers due to intermittent ventilation  
Doctoral thesis, NTNU, 2010
- [28] Tunnel thruster ventilation tests  
MARINTEK Review, May 2011
- [29] Savio, L., Steen, S.  
Identification and Analysis of Full Scale Ventilation Events  
International Journal of Rotating Machinery, Volume 2012

- [30] Abdel-Maksoud, M., Rung, Th., Greve, M., Wöckner, K.  
ProSee – Numerische Untersuchung der Propellerbelastungen im Seegang  
Abschlussbericht zum Teil-Forschungsvorhaben, TUHH
- [31] Abdel-Maksoud, M., et al.  
PropSeas – Propulsion in Seaways  
Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik, Tagungsband der Statustagung 2011
- [32] Nordtveit, R., Nygard, B., Jullumstro, E.  
Thrust Degradation in DP Operations – DP Model Test of an Aframax Shuttle Tanker –  
Methods, Results, Operations  
Dynamic Positioning Conference, October 2007, Houston
- [33] Van Dijk, R. R. Th., Aalbers, A. B.  
“What Happens in Water” – The use of Hydrodynamics to Improve DP  
Dynamic Positioning Conference, September 2001
- [34] Aalbers, A. B., et al.  
Developments in Dynamic Positioning Systems for Offshore Stationkeeping and Offloading  
OMAE, 1995
- [35] Ruth, E., Smogeli, O.  
Ventilation of Controllable Pitch Thruster  
Marine Technology, Vol. 43, No. 4, October 2006
- [36] n. n.  
Seakeeping Tests (with ships) – Experimental Methods in Marine Hydrodynamics,  
Lecture in week 43  
NTNU – Norwegian University of Science and Technology
- [37] Sprenger, F., et. al  
Experimental Studies on Seakeeping and Manoeuvrability of Ships in Adverse  
Weather Conditions – SHOPERA-Project  
SNAME Maritime Convention, Bellevue, Washington, November 2016
- [38] Steinwand, M.  
Messungen der Wellendriftkräfte am Modell der “Edda Fram”  
SVA Bericht 5051, 2019 (unveröffentlicht)
- [39] Mertes, P.  
Schottel, E-Mail vom 03.05.2018 „AW: Transverse Thruster – Schubumkehrzeiten“
- [40] Hinnenthal, J.  
JASTRAM, Telefongespräch, Mai 2018
- [41] Steinwand, M.  
Messung der Querstrahlruderkräfte durch instationäre Drehzahlvariation und Ventilation an  
modifizierten Vorschiffen der „Edda Fram“  
SVA Bericht 4875, 2019 (unveröffentlicht)

- [42] Koushan, K.  
Dynamics of Propeller Blade and Duct Loading on Ventilated Thrusters in Dynamic Positioning Mode  
Dynamic Positioning Conference, October 2007, Trondheim, Norway
- [43] Brix, J.  
Manoeuvring Technical Manual  
Seehafen Verlag, 1993, Hamburg
- [44] Steinwand, M.  
Experimentelle Simulation von Schiffsbewegungen für die Auslegung von Dynamic Positioning mit Motionstabilisierung  
Abschlussbericht FuE-Vorhaben DPMotion, Bericht 4539, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, 2016