



**Schlussbericht zum FuE-Vorhaben  
„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit  
Verstellpropellern und Hybridantrieben“**

**Teilvorhaben  
„ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“**

Bericht 4579

Potsdam, Februar 2017

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>
<b>3. Titel</b>  <b>Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern</b>  Schlussbericht zum FuE-Vorhaben „OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“  Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Steinwand, Marc	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>31.08.2016</b>
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH Marquardter Chaussee 100 14469 Potsdam	9. Ber. Nr. Durchführende Institution <b>4579</b>
	10. Förderkennzeichen <b>03SX356B</b>
	11. Seitenzahl <b>53</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  Projektträger Jülich Postfach 61 02 47 10923 Berlin	13. Literaturangaben <b>17</b>
	14. Tabellen <b>3</b>
	15. Abbildungen <b>39</b>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
<b>18. Kurzfassung</b> Ziel des Teilvorhabens der SVA Potsdam im Verbundvorhaben war die Entwicklung eines Verstellpropellersystems im Modellmaßstab, das die Steigungen der Propellerflügel während des Versuchs dynamisch ändern kann. Dementsprechend sollte die dazugehörige messtechnische Umgebung zur Durchführung von Modellversuchen realistischer Stoppmanöver von Schiffen mit Verstellpropellern realisiert werden. Das System sollte eine Datenbasis in systematischen Versuchen mit dem freifahrenden Verstellpropeller und dem manövrierenden Schiff erarbeitet und den Projektpartnern zur Verfügung stellen.  Beim Stoppen von Schiffen haben drei Komponenten entscheidenden Einfluss: Der Schiffswiderstand, der Propeller und die Maschinenanlage. Durch die genaue Berücksichtigung der Eigenschaften der Kennfelddaten von dieselektrischen Propellerantrieben ist es möglich optimale Betriebsbedingungen für ein schnelles Aufstoppen herzustellen. Insbesondere die Kombination von dieselektrischen Antrieben und Verstellpropellern eröffnet neue Möglichkeiten, den Ablauf des Stoppmanövers mit dem Ziel zu optimieren, den Stoppweg zu verkürzen und die Belastung der einzelnen Komponenten der Antriebsanlage zu verringern.  Zur Entwicklung und Validierung des Simulationsverfahrens an der TUHH war eine Datenbasis notwendig. Diese Daten wurden in systematischen Versuchen mit dem freifahrenden Verstellpropeller und dem manövrierenden Schiff erarbeitet werden. Die SVA hat die Validierungsversuche in enger Abstimmung mit den Projektpartnern durchgeführt. Es sind zudem Vergleichsmessungen zwischen dem bestehenden System mit fest einstellbaren Verstellpropellern und dem neu entwickelten System mit dynamisch verstellbaren Verstellpropellern realisiert worden.	
<b>19. Schlagwörter</b> Manövrieren, Modellversuche, Stoppversuche, Verstellpropeller	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)
<p>3. title</p> <p style="text-align: center;"><b>Experimental investigation of the stopping ability of ships with controllable pitch propellers</b></p> <p style="text-align: center;">Final report of the R&amp;D-project „Optimisation of the stopping ability of ships with controllable pitch propellers and hybrid propulsors“</p> <p style="text-align: center;">Partial project „Experimental investigation of the stopping ability of ships with controllable pitch propellers“</p>	
<p>4. author(s) (family name, first name(s))</p> <p>Steinwand, Marc</p>	<p>5. end of project</p> <p style="text-align: center;">31.08.2016</p>
	<p>6. publication date</p>
	<p>7. form of publication</p>
<p>8. performing organization(s) (name, address)</p> <p>Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH Marquardter Chaussee 100 14469 Potsdam</p>	<p>9. originator's report no.</p> <p style="text-align: center;">4579</p>
	<p>10. reference no.</p> <p style="text-align: center;">03SX356B</p>
	<p>11. no. of pages</p> <p style="text-align: center;">53</p>
<p>12. sponsoring agency (name, address)</p> <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie</p> <p>Projektträger Jülich Postfach 61 02 47 10923 Berlin</p>	<p>13. no. of references</p> <p style="text-align: center;">17</p>
	<p>14. no. of tables</p> <p style="text-align: center;">3</p>
	<p>15. no. of figures</p> <p style="text-align: center;">39</p>
<p>16. supplementary notes</p>	
<p>17. presented at (title, place, date)</p>	
<p>18. abstract</p> <p>The objective of the SVA Potsdam subproject in the joint project was the development of a controllable pitch propeller system that can dynamically change the pitch of the propeller blades during the test. Accordingly, the related measurement technique should be developed to carry out model tests of realistic stop maneuvers of ships with controllable pitch propellers. The system was used to develop a data base in systematic tests with the free-running propeller and the manoeuvring vessel and to make the data available to the project partners.</p> <p>For stopping ships, three components have a decisive influence: the ship's resistance, the propeller and the machinery. Due to the precise consideration of the characteristics of diesel-electric propeller drives, it is possible to produce optimal operating conditions for crash stops. In particular, the combination of these electric drives and controllable pitch propellers opens up new possibilities for optimizing the process of stop manoeuvres with the aim of shortening the stopping distance and reducing the load on the individual components of the propeller system.</p> <p>A data basis was necessary to develop and validate the simulation method at the TUHH. These data have been worked out in systematic open water tests with controllable pitch propeller and the manoeuvring tests with the vessel. The SVA carried out the validation tests in close cooperation with the project partners. Comparative measurements have also been made between the existing system with fixedly adjustable variable pitch propellers and the newly developed system with dynamically adjustable variable pitch propellers.</p>	
<p>19. keywords</p> <p>Manoeuvring, Model tests, Stopping tests, Controllable Pitch Propellers</p>	
20. publisher	21. price

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Schlussbericht für das Forschungsvorhaben 03SX356B

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Schlussbericht für das Forschungsvorhaben 2054

„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

**„Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“**

von

Dipl.-Ing. Marc Steinwand

**Beteiligte Forschungseinrichtungen**

- BVN** Blohm + Voss Naval GmbH (jetzt thyssenkrupp Marine Systems GmbH)  
Herr Dr.-Ing. Wolfgang Sichermann  
Hermann-Blohm-Str. 3  
20457 Hamburg  
Tel.: 040 / 3119 1932  
Fax.: 040 / 3119 3491  
Email: [wolfgang.sichermann@thyssenkrupp.com](mailto:wolfgang.sichermann@thyssenkrupp.com)
- TUHH** Technische Universität Hamburg-Harburg (jetzt Technische Universität Hamburg)  
Institut für Fluidodynamik & Schiffstheorie (FDS)  
Herr 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)
- Siemens** Siemens AG  
Herr Kay Tigges  
Industry Sector, Industry Solutions Division, Industrial Technologies, I IS IN 1  
MAS MTE  
Lindenplatz 2  
20099 Hamburg, Germany  
Tel.: 040 / 2889 3263  
Fax: 040 / 2889 2734  
Email: [kay.tigges@siemens.com](mailto:kay.tigges@siemens.com)
- SVA** Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH  
Herr Marc Steinwand  
Marquardter Chaussee 100  
14469 Potsdam  
Tel.: +49 0331 567 12 11  
Fax.: 0331 / 567 12 49  
Email: [steinwand@sva-potsdam.de](mailto:steinwand@sva-potsdam.de)

## **„Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern“**

Schlussbericht zum FuE-Vorhaben

„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

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 01.09.2013 bis 31.08.2016 realisiert.

Dipl.-Ing. Marc Steinwand  
Projektleiter

Dr.-Ing. Christian Masilge  
Geschäftsführer

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Februar 2017

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite
I. Kurzdarstellung	5
I.1 Aufgabenstellung	5
I.2 Voraussetzungen	8
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
I.4 Stand Wissenschaft und Technik	18
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	25
II. Eingehende Darstellung	26
II.1 Ergebnisse des FuE-Vorhabens	26
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis	46
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	47
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse	49
II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	50
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	50
Verwertungsplan mit Zeithorizont	51

## **I. Kurzdarstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Ziel des Teilvorhabens der SVA Potsdam im Verbundvorhaben war die Entwicklung eines Verstellpropellersystems im Modellmaßstab, das die Steigungen der Propellerflügel während des Versuchs dynamisch ändern kann. Dementsprechend sollte die dazugehörige messtechnische Umgebung zur Durchführung von Modellversuchen realistischer Stoppmanöver von Schiffen mit Verstellpropellern realisiert werden. Das System sollte eine Datenbasis in systematischen Versuchen mit dem freifahrenden Verstellpropeller und dem manövrierenden Schiff erarbeitet und den Projektpartnern zur Verfügung stellen.

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: Voruntersuchungen**

##### **AP1.1 Propellerentwurf**

Für vier Schiffe sollen Verstellpropeller entworfen werden. Dazu müssen die Schiffs- und Entwurfsdaten mit den Partnern abgestimmt werden.

#### **AP 2: Experimentelle Untersuchungen**

##### **AP2.1 Entwicklung eines Verstellpropellersystems (VPS)**

Die Entwicklung eines Verstellpropellermodells (VPS) mit der Fähigkeit der Verstellung der Steigung der Flügel während der Fahrt ist eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung der Stoppmanöver mit einem freifahrenden Schiffsmodell.

Die Verstellung der Flügel soll über einen in der Nabe integrierten Schrittmotor mit Getriebe und Verstellmechanismus erreicht werden. Die Stromversorgung und Ansteuerung des Schrittmotors soll über eine Hohlwelle und einem Schleifringssystem erfolgen.

Problematisch ist die Montage der Verstellpropellernabe an die Antriebswelle. Der zu wählende Modellmaßstab muss auch diese Problematik berücksichtigen.

In Vorbereitung der Konstruktion muss ein Verstellpropeller (Schiff) für das FuE-Vorhaben ausgewählt werden. Durch systematische Berechnungen wird das Kennfeld des Verstellpropellers prognostiziert, um die Kräfte und Momente am Einzelflügel bestimmen zu können (siehe AP 1.1).

Für die Entwicklung des Verstellpropellersystems sind drei Entwicklungsschleifen vorgesehen. Zunächst wird ein Prototyp entwickelt, der dann einer zweiten Schleife weiterentwickelt wird und schlussendlich in den Versuchsbetrieb überführt wird.



## **AP2.2 Fertigung des Verstellpropellersystems (VPS)**

Aufbauend auf der Konstruktion des Verstellpropellersystems erfolgt die Fertigung der Verstellpropellernabe mit Antriebswelle, Stromversorgung, Schleifringssystem und Ansteuerung des Elektromotors. Neben der Nabe ist ein wasser- und druckdichter Zylinder für den Schrittmotor zu fertigen. Der Schrittmotor muss umgebaut werden (Minimierung der Abmessungen, Umsetzen des Kabelanschlusses).

## **AP2.3 Fertigung der Verstellpropellerflügel (VPS, VP)**

Es sollen drei Flügelsätze gefertigt werden. Zwei Flügelsätze (VP1 und VP2) werden für Standardnaben und den Standardverstellpropeller (VP) gefertigt. Die Anzahl der Flügel ist Ergebnis des Entwurfsprozesses. Die Steigung der Propeller wird hier manuell auf einer Anbohrmaschine eingestellt und durch eine Klemmung fixiert.

Beide Verstellpropeller sollen für die Durchführung von Freifahrtversuchen in vier Quadranten ohne und mit Kavitationseinfluss eingesetzt werden.

Für einen der zwei Verstellpropeller wird das Verstellpropellersystem entwickelt (AP2.1 und 2.2). Dazu muss ein Flügelsatz für die Verstellpropellernabe mit dem Schrittmotor gefertigt werden. Die Aufnahme der Flügelfüße und die Anbindung an den Verstellmechanismus erfordern aufwendige feinmechanische Fertigungsschritte.

## **AP2.3 Freifahrtversuche mit den konventionellen Verstellpropellern (VP1, VP2)**

Mit den konventionellen Verstellpropellern werden Freifahrtversuche in der Schlepprinne durchgeführt. Zur Erfassung des Kennfeldes der Verstellpropeller sollen Versuche mit je 12 Steigungsverhältnissen in den vier Quadranten durchgeführt werden.

Zur Erfassung des Einflusses der Kavitation auf die Kennwerte der Verstellpropeller sollen Freifahrtversuche mit je 12 Steigungsverhältnissen in den vier Quadranten bei Kavitationsidentität durchgeführt werden. Die Kavitationseigenschaften in abgestimmten Betriebspunkten werden erfasst (Skizzen, Fotos, Videos).

## **AP2.5 Erprobung des Verstellpropellersystems (VPS)**

Zur Realisierung von Freifahrtversuchen mit dem Verstellpropellersystem muss ein spezieller Versuchsaufbau konzipiert, gefertigt und erprobt werden. Für die Versuche soll ein Freifahrtgerät genutzt werden. Auf einem Geräteträger sollen ein Innenantriebsdynamometer sowie die Schleifringabnehmer montiert werden. Der Geräteträger wird in dem Freifahrtgerät angeordnet und mit der Antriebswelle verbunden.

In systematischen Versuchen soll das Verstellpropellersystem erprobt werden (Verstellung der Steigung bei unterschiedlichen Belastungen, Kontrolle der Steigungen, statische und dynamische Freifahrtversuche).

## **AP2.6 Überarbeitung bzw. Weiterentwicklung des Verstellpropellersystems (VPS)**

Aus der Analyse der Ergebnisse der ersten Erprobung wird das Verstellpropellersystem kontrolliert und weiterentwickelt bzw. überarbeitet werden. Gegebenenfalls werden konstruktive Änderungen durchgeführt.

In systematischen Versuchen soll das überarbeitete Verstellpropellersystem erneut erprobt werden (Verstellung der Steigung bei unterschiedlichen Belastungen, Kontrolle der Steigungen, statische und dynamische Freifahrtversuche).

## **AP2.7 Überführung des Verstellpropellersystems (VPS) in den Versuchsbetrieb**

Das überarbeitete Verstellpropellersystem wird an die Versuchsumgebung der SVA angepasst. Es werden Standardschnittstellen erstellt oder verwendet, die eine effiziente Verwendung des VPS im Versuchsbetrieb ermöglichen.

Es werden die notwendigen Vergleichsversuche zu den herkömmlichen Verstellpropellern durchgeführt.

## **AP2.8 Fertigung des Modells mit einer Wellenleitung für das Verstellpropellersystem (VPS)**

Für die Manövrierversuche wird ein Modell eines Einschraubers in Abstimmung mit den Partnern ausgewählt und im Maßstab des Modellpropellers gefertigt. Es werden 2 Hinterschiffe gefertigt. Das erste Hinterschiff wird für die experimentellen Untersuchungen mit den herkömmlichen Verstellpropellern verwendet, um den Projektpartnern in der Anfangsphase des Projektes Messdaten für die numerischen Berechnungen zur Verfügung zu stellen. Beim 2. Hinterschiff wird gewährleistet werden, dass das Verstellpropellersystem eingebaut und mit der vorhandenen Messtechnik auf einem Geräteträger verbunden wird. kann erst nach Überführung des entwickelten Verstellpropellersystems in den Versuchsbetrieb gefertigt werden.

Für die Versuche mit dem konventionellen Verstellpropeller soll das Modell mit einem Querkraftmessglied im Stevenrohrlager ausgerüstet werden. Das Ruder wird an einer 3-Komponentenwaage befestigt, um die Kräfte am Ruder messen zu können.

## **AP2.9 Widerstands- und Propulsionsversuche, Schiff mit Verstellpropeller (VP)**

Zur Validierung der CFD-Berechnungen der TUHH werden Widerstands- und Propulsionsversuche mit dem Modell mit einem konventionellen Verstellpropeller in Designsteigung durchgeführt. Zusätzlich zum konventionellen Propulsionsversuch werden die Querkräfte am Propeller und die Kräfte am Ruder gemessen.

## **AP2.10 Kraftmessungen und Stopp-Versuche mit dem Modell mit Verstellpropeller (VP)**

Systematische Propulsionsmessungen sollen mit dem fest eingespannten Modell durchgeführt werden, um quasistationäre Betriebspunkte des Stoppmanövers des Schiffes untersuchen zu können. Die Kräfte am Modell, am Propeller und Ruder werden dabei gemessen. Die Steigung des

Propellers wird in 12 Schritten variiert. Zur Bestimmung der Betriebsparameter für die Versuche wird eine Prognose des Stoppmanövers erarbeitet.

Mit dem freifahrenden Modell werden Stoppmanöver gefahren. Die Steigung des Propellers entspricht dabei der Konstruktionssteigung, die Versuchsergebnisse entsprechen den üblichen Untersuchungen für Schiffe mit Verstellpropeller.

#### **AP2.11 Manövrierversuche mit dem Modell mit Verstellpropeller (VP)**

Mit dem Modell mit dem konventionellen Verstellpropeller werden Z-Manöver und Drehkreismanöver in der Schlepprinne für unterschiedliche Geschwindigkeiten durchgeführt. Die Auswertung der Versuche erfolgt auf Basis der Systemidentifikation.

#### **AP2.12 Analyse und Dokumentation der Experimentellen Untersuchungen**

Die Daten der Experimentellen Untersuchungen werden ausgewertet und analysiert. Versuche in den verschiedenen Versuchsanlagen werden verglichen. Ein abschließender Messbericht wird formuliert.

### **AP 10: Validierung**

#### **AP10.1 Erprobung des Modells mit dem Verstellpropellersystem (VPS)**

Zur Vorbereitung der Manövrierversuche mit dem Verstellpropellersystem werden Vorversuche durchgeführt. Dabei werden Propulsions- und Manövrierversuche mit konstanter Steigung im Vergleich zu den Versuchen mit dem konventionellen Verstellpropeller durchgeführt.

#### **AP10.2 Manövrierversuche Modell mit VPS**

Mit dem Modell mit dem Verstellpropellersystem werden Z-Manöver und Drehkreis- und Stoppmanöver unter Freifeldbedingungen für unterschiedliche Geschwindigkeiten durchgeführt. Es wird eine große Menge an Daten aufgenommen, die dem komplizierten Versuchsaufbau als auch dem Validierungsbedürfnis der Projektpartner geschuldet ist.

#### **AP10.3 Analyse und Dokumentation der Validierungsversuche**

Die Daten der Validierungsversuche (auch Fotos, Videos) werden ausgewertet und analysiert. Es findet ein weitreichender Vergleich mit den Messwerten der experimentellen Untersuchungen statt. Ein abschließender Messbericht wird formuliert.

## **I.2 Voraussetzungen**

Im Zeitraum von 1970 bis 2005 wurden in der SVA u. a. die FuE-Vorhaben „Bestimmung der Kenngrößen zur Beurteilung der Steuerbarkeit von Schiffen“ (1977) [SVA1], [SVA2], [SVA3], „Untersuchung des Manövrierverhaltens von Fracht- und Fischereifahrzeugen“ (1980) [SVA4], [SVA5], [SVA6], „Bewegungsverhalten von Schiffen II“ (1988) [SVA7], [SVA8], „Einfluss der

Heckgestaltung auf das Manövrierverhalten seegehender Frachtschiffe“ (1994) [SVA9], [SVA10], [SVA11], „Systemidentifikation manövrierender Schiffe“ (2002) [SVA12] und „Entwicklung und Einsatzuntersuchungen für ein hocheffizientes Halbschweberuder anstelle eines Heckstrahlruders für Containerschiffe“ (2005) [SVA13] durchgeführt. Im Rahmen von RGW-Themen wurden insbesondere in Zusammenarbeit mit dem BSHC in Varna (Bulgarien), dem CTO in Gdansk (Polen) und der Universität Rostock Vorhaben zur Ermittlung der Manövriereigenschaften von Schiffen im Großausführungsmaßstab und zur Vorhersage des Manövrierhaltens mit dem Verfahren der Systemidentifikation bearbeitet.

Eine immer wiederkehrende Frage ist die, wie sich die Ergebnisse der mit einem Schiffsmodell durchgeführten Manövrier- und Stoppversuche auf die Großausführung übertragen lassen. Korrelationsuntersuchungen wurden von der SVA unter anderem für ein Containerschiff durchgeführt [SVA14].

Die experimentelle Untersuchung von Verstellpropellern ist ein Schwerpunkt der Arbeit der SVA seit über 40 Jahren. So wurde Messtechnik für instationäre Kraft- und Momentenmessungen am Einzelflügel in den 70er und 80er Jahren in der SVA Potsdam entwickelt und insbesondere für die Ermittlung der Flügelverstellmomente von Verstellpropellern eingesetzt [SVA15], [SVA16].

Die Problematik des Stoppens von Schiffen und die dabei auftretenden Kräfte und Momente sind insbesondere durch die Entwicklung und den Einsatz von Podded Drives und Thrustern seit etwa 15 Jahren sehr aktuell. Zur Ermittlung der globalen Belastungen von Podded Drives bei unterschiedlichen Schwenkwinkeln und Betriebsbedingungen wurde das vom BMWi geförderte Vorhaben „Hydrodynamische Dimensionierungslasten für Podded Drives“ durchgeführt [SVA17].

Die Belastung von Festpropellern beim Umsteuern sowie bei speziellen Betriebszuständen (blockierter Propeller) wurden im vom BMBF geförderten FuE-Vorhaben „Numerische und experimentelle Untersuchung der Umströmung von Schiffspropellern im Bereich von vier Quadranten“ untersucht [SVA18], [SVA19].

Die Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam verfügt über die Hard- und Software zum Entwurf- und zur Nachrechnung von Verstellpropellern. Versuchsanlagen und Messsysteme zur Durchführung von Standarduntersuchungen mit Verstellpropellern sowie von Versuchen mit Schiffsmodellen sind vorhanden.

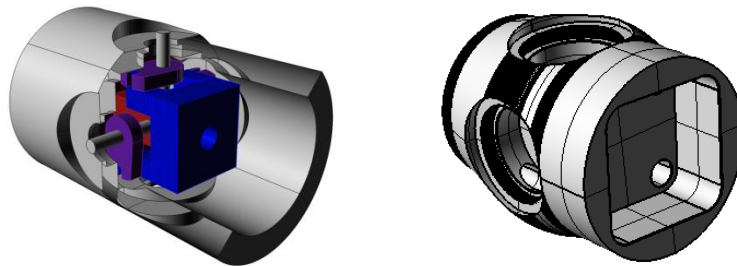
### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben OptiStopp war auf eine Gesamtlaufzeit von drei Jahren angelegt. Die zeitliche Planung für die SVA ist dem Balkenplan der Tabelle in Abbildung 1 zu entnehmen.



### Arbeiten der SVA im Zeitraum 01.09.2013 – 31.08.2014

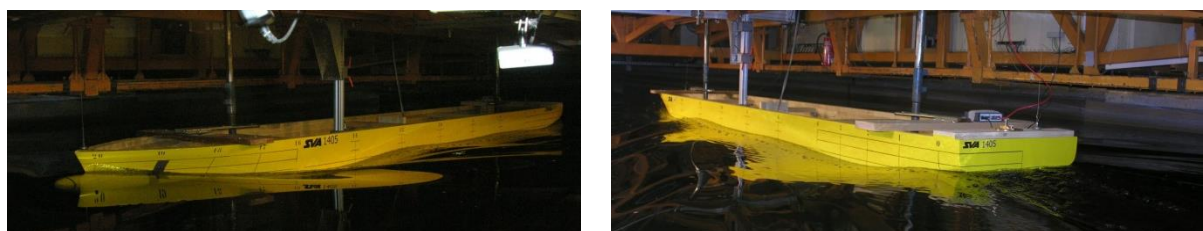
Es wurde bei der Entwicklung des Verstellpropellersystems ein Ausgangsentwurf systematisch durchgerechnet, der letztendlich verworfen wurde. Die zu erwartenden Reibungskräfte in der Verstellpropellermechanik wären zu groß für einen in der möglichen Größe einsetzbaren Antriebsmotor. Daher wurde mit einer neuen Konstruktion bzw. Modifikation des Ausgangsentwurfs der Verstellpropellernabe, der Fertigung und Erprobung begonnen (Abb. 2).



**Abbildung 2: Ausgangsentwurf (links) und modifizierter Entwurf (rechts) für das Verstellpropellersystem**

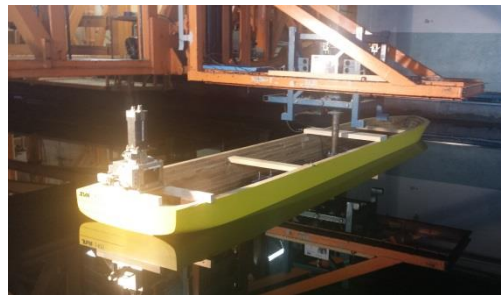
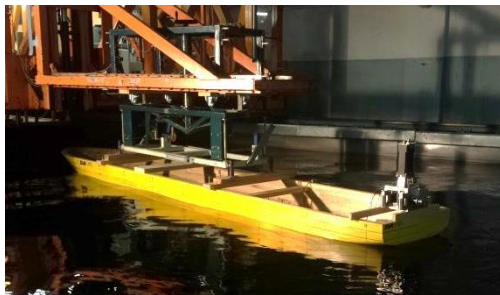
Das Verstellpropellersystem wurde erprobt. Aus den Erkenntnissen der Erprobungen wurde das gefertigte Verstellpropellersystem kontinuierlich konstruktiv und mechanisch weiterentwickelt. Fertigung, Erprobung und Überarbeitung des Verstellpropellersystems sind als ein Prozess zu verstehen der kontinuierlich bearbeitet wird und auf die bereits gemachten Erfahrungen basiert.

In Absprache mit den Partnern wurden mit dem Modell eines Feeders (M1405) erweiterte Widerstands- und Propulsionsversuche durchgeführt (Abb. 3). Es wurde ein Geschwindigkeitsbereich von 4 – 17 kn untersucht, um auch den Leistungs- bzw. Drehmomentenbedarf im unteren Geschwindigkeitsbereich aufnehmen und für die Validierung der Berechnungen der Projektpartner verwenden können.



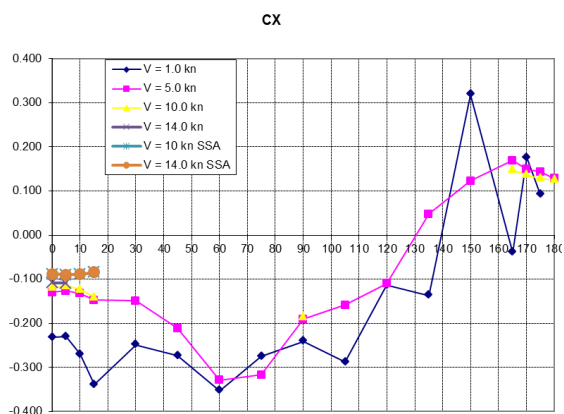
**Abbildung 3: Wellenbild bei  $V = 14$  kn während der Propulsionsversuche mit dem Modell M1405 (Feeder)**

Kraftmessungen wurden wie vorgesehen über einen Winkelbereich der Anströmung von  $180^\circ$  durchgeführt. Aufgrund der großen Kräfte bei Geschwindigkeiten von  $V = 14$  kn wurden in dem Winkelbereich der Anströmung von  $0^\circ - 15^\circ$  ein alternativer Messaufbau verwendet (Abb. 4).

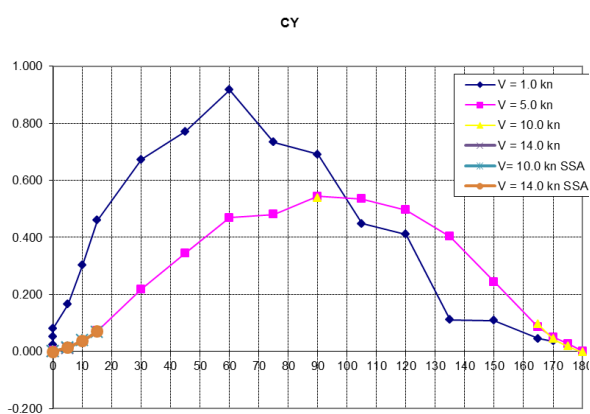


**Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Kraftmessungen mit 2 unterschiedlichen Messwaagen mit dem Modell M1405 (Feeder)**

Die Ergebnisse wurden den Projektpartnern in Form von Versuchsberichten zur Verfügung gestellt (Abb. 5).



Beiwerte für die x-Kräfte über 180° Anströmung

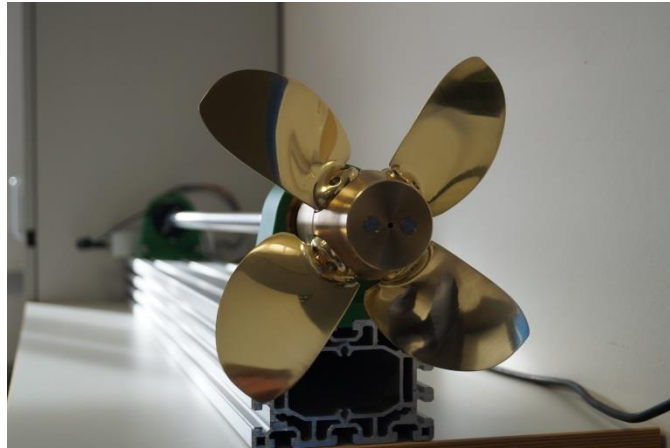


Beiwerte für die y-Kräfte über 180° Anströmung

**Abbildung 5: Darstellung der Versuchsergebnisse aus den Kraftmessungen mit dem Labormodell M1405**

Die Stoppversuche wurden mit dem Messaufbau für Propulsionsversuche durchgeführt, indem unterschiedliche Variationen von Schiffsgeschwindigkeiten, Propellerdrehzahl und Propellersteigung untersucht wurden. Es wurden dabei die Modell-, die Propeller- und die Ruderkräfte gemessen. Das Bewegungsverhalten beim Stoppen wurde im Zusammenhang mit den Manövrierversuchen zusätzlich aufgezeichnet.

## Arbeiten der SVA im Zeitraum 01.09.2014 – 31.08.2015



**Abbildung 6: Verstellpropellersystem vor der Überführung in den Versuchsbetrieb**

Die finale Version des Verstellpropellersystems wurde in den Versuchsbetrieb überführt und stand für den weiteren geplanten Einsatz zur Verfügung (Abb. 6).

Es sind als erstes vergleichende Testmessungen Propulsionsversuche mit dem Modell M1405 des Feeders durchgeführt worden. Es wurde konventioneller Propulsionsversuch mit konstanter Steigung und variabler Drehzahl realisiert, der dem Propulsionsversuch mit dem klassischen Verstellpropeller für Modellversuche entspricht. Zudem wurde ein Propulsionsversuch mit konstanter Drehzahl und variabler Steigung, wie er nur durch das neuentwickelte Verstellpropellersystem zu realisieren ist, ausgeführt.

Die Freifahrtversuche mit den Verstellpropellern wurden durchgeführt. Es wurden die Propellercharakteristika über 4 Quadranten für 12 verschiedene Steigungen gemessen und ausgewertet. Die Versuche wurden in der Schlepprinne der SVA durchgeführt (Abbildung 7)

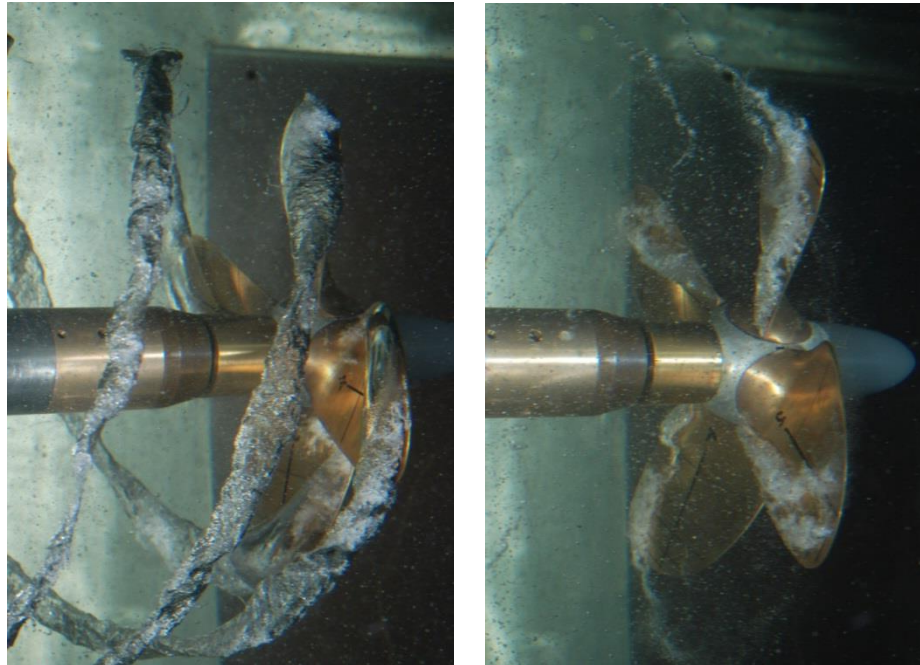


**Abbildung 7: Versuchsaufbau für die 4-Quadrantenmessungen**

Im Anschluss wurden mit dem Propeller für die 12 untersuchten Steigungen Kavitationsversuche im



Kavitationstunnel der SVA durchgeführt. Die Untersuchungen zeigt teilweise stark fluktuierende Kavitationserscheinungen (Abb. 8).



**Abbildung 8: Kavitationsversuche mit dem Propeller VP1143 über 4 Quadranten und 12 Steigungen**

Es wurden Manövrierversuche auf einem See in der Nähe der SVA Potsdam erfolgreich durchgeführt. Das Modell wurde entsprechend den Absprachen mit den Projektpartnern ballastiert. Es wurden Drehkreise, Z-Manöver und Stoppmanöver durchgeführt (Abb. 9).



**Abbildung 9: Manövrierversuche**

## **Arbeiten der SVA im Zeitraum 01.09.2015 – 31.08.2016**

### **Stoppversuche**

Mit dem Modell M1405 (Abb. 10), ausgerüstet mit dem Verstellpropellersystem VP1697, wurden Stoppversuche in der Schlepprinne der SVA Potsdam durchgeführt. Die Versuche wurden mit variabler Propellersteigung (bei konstanter Propellerdrehzahl) und variabler Propellerdrehzahl (bei

konstanter Propellersteigung) durchgeführt. Der Kombinatormodus (variable Propellersteigung und -drehzahl) wurde in dieser Testserie nicht untersucht.



**Abbildung 10: Modell M1405 mit Verstellpropellersystem VP1697**

Die Stoppversuche wurden mit zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten realisiert. Zum einen war das Modell freifahrend. Im Stoppvorgang konnte das Modell somit seitlich ausbrechen. Aufgrund der begrenzten Breite der Rinne (9 m) mussten diese Versuche vor dem vollkommenden Aufstoppen wegen des seitlichen Ausbrechens abgebrochen werden. Daher wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der ein seitliches Ausbrechen des Modells durch zwei Geradeführungen verhindert. Die Bewegung in x-Richtung wurde dabei nicht beeinflusst (Abb. 11). Mit diesem Versuchsaufbau war es möglich, den Stoppversuch bis zum Stoppen ( $V = 0$  kn) durchzuführen.



Versuchsaufbau freifahrend



Versuchsaufbau seitlich geführt

**Abbildung 11: Versuchsaufbauten zur Durchführung von Stoppversuchen**

Als Resultat der Analyse der Projektpartner wurde gemeinsam ein Versuchsprogramm erarbeitet, mit dem der optimale Ablauf eines Stoppmanövers für das gegebene Schiffsmodell realisiert werden konnte. Dafür wurden die Stoppmanöver auch im Kombinatormode (variable Propellersteigung und -drehzahl) durchgeführt. Die abschließenden Stopp- und Manövierversuche wurden im Freifeld durchgeführt (Abb. 12).



**Abbildung 12: Manövrierversuche mit dem Verstellpropellersystem**

#### **4-Quadrantenmessungen**

Die 4-Quadrantenmessungen ohne und mit Kavitation wurden mit beiden konventionellen Verstellpropellern VP1143 und VP1723 erfolgreich abgeschlossen. Es wurden die Propellercharakteristika über 4 Quadranten für 12 verschiedene Steigungen gemessen und ausgewertet. Für beide Propeller kann abgeleitet werden, dass die Kavitation nur geringen Einfluss auf die 4-Quadrantencharakteristik hat.

Eine Auswahl der eingestellten Steigungen von Propeller VP1723 für die Versuche ist in Abbildung 13 dargestellt.

Die Ergebnisse der Modellversuche wurden den Projektpartner für weitere Analysen zur Verfügung gestellt.

**VP1723 mit  $P_{0.7}/D = -0.216$** **VP1723 mit  $P_{0.7}/D = 0.015$** **VP1723 mit  $P_{0.7}/D = 0.483$** **VP1723 mit  $P_{0.7}/D = 0.731$** **VP1723 mit  $P_{0.7}/D = 2.007$** **VP1723 mit  $P_{0.7}/D = 3.070$** **Abbildung 13: Auswahl eingestellter Propellersteigungen für 4-Quadrantenmessungen (VP1723)**

## I.4 Stand Wissenschaft und Technik

### Bekannte Konstruktionen, Verfahren, Schutzrechte

Schiffe werden heutzutage und in absehbarer Zukunft überwiegend mit Propellern angetrieben. Propeller dienen nicht nur zum Vortrieb der Schiffe, sondern sind auch entscheidend für das Abbremsen und Manövrieren.

Beim Notstopmanöver eines beladenen Frachtschiffes mittlerer Größe werden ca. 60% der Bremsarbeit durch den Propeller geleistet. Die restliche Bremsarbeit leistet der Widerstand des Schiffes [1].

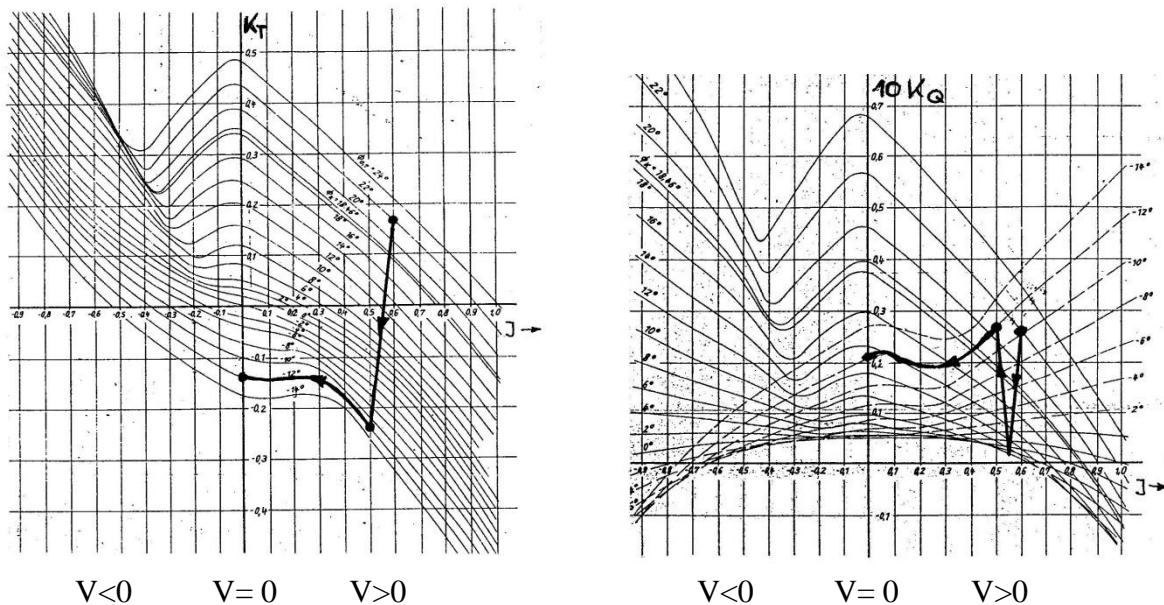
Propeller werden für einen oder mehrere Betriebspunkte in Vorausfahrt entworfen. In diesen Betriebspunkten müssen sie die vorhandene Leistung der Antriebsanlage aufnehmen und mit hoher Effektivität in Schub umsetzen. Das Entwurfsziel ist zumeist die Erreichung eines maximalen Schubes bei minimalem Leistungsbedarf. Der Entwerfer hat die Festigkeit des Propellers, die Kavitationsgefährdung und die Druckschwankungen zu berücksichtigen, die der Propeller am Schiff verursacht, sowie das Zusammenwirken von Schiff, Anhängen, Maschine und Propeller.

Zur Berechnung der Umströmung und zur Vorhersage der Kräfte und Momente auf Propellern stehen für die stationäre Geradeausfahrt Traglinienverfahren, welche auf den Verfahren von Lerbs [2] beruhen und Tragflächenverfahren, basierend auf den Arbeiten von Kerwin et al [3], zur Verfügung. Diese sind Verfahren zur Nachrechnung der Propellerumströmung sowie zur Ermittlung der Kräfte und Momente an einem Propeller. Diese potenzialtheoretischen Verfahren sind sehr schnell und daher für den Propellervorentwurf gut geeignet.

Bei Verwendung von Verstellpropellern müssen die hydrodynamischen Kennwerte in Form der Freifahrtkennlinien  $K_T$ ,  $K_Q = f(J, P/D)$  ermittelt werden. Die Berechnungsverfahren müssen dabei den gesamten Verstell- und Fortschrittsgradbereich des Verstellpropellers vom Fahrzustand „volle Fahrt voraus“ bis zum Fahrzustand „volle Fahrt zurück“ (4 Quadranten) abdecken [1], [4], [5], [6], [7], [8]. Problematisch sind dabei die Berücksichtigung der Kavitation auf die Kennwerte sowie der Betriebszustände, bei denen der Propellerstrahl gegen die Anströmung gerichtet ist (Stoppen aus Vorwärts- und Rückwärtsfahrt durch Umsteuern des Propellers).

Die viskosen Effekte am Propeller (Ablösungs- und Rückströmungserscheinungen) bei den Stoppmanövern werden überwiegend mit statistischen Korrekturfaktoren (abgeleitet aus Modellversuchen) berücksichtigt [4], [5]. Dazu wurden systematische Versuche mit Verstellpropellern ohne und mit Kavitation durchgeführt und analysiert. Neben den Versuchen am freifahrenden Propeller wurden Propulsionsversuche bei Umsteuervorgängen vorgenommen. Die Messungen erfolgten immer unter stationären Bedingungen.

Die Diagramme in Abbildung 14 zeigen die Kennfelder der Schub- und Drehmomentenbeiwerte eines Verstellpropellers sowie die Änderung der Kennwerte beim Stoppen.



**Abbildung 14: Kennfeld eines Verstellpropellers, Variation der Propellerkennwerte beim Stoppen [Wagner (Vorlesungsunterlagen)]**

Die für die üblichen Betriebszustände entwickelten potenzialtheoretischen Berechnungsverfahren sind nicht geeignet, die Umströmung bei Umsteuervorgängen exakt zu erfassen. Die Bremswirkung des Propellers, d.h. der Widerstand des Propellers (Turbinenbetrieb), und somit auch die Belastung der Bauteile der Antriebsanlage im Kraftfluss werden durch die turbulenten Vermischungsvorgänge in der Umgebung des Propellers erzeugt.

Die viskosen Effekte der Propellerumströmung können mit numerischen Verfahren berücksichtigt werden. Die Berechnungsergebnisse für freifahrende Propeller weisen eine gute Übereinstimmung mit Messergebnissen auf [9], [10], [11], [12].

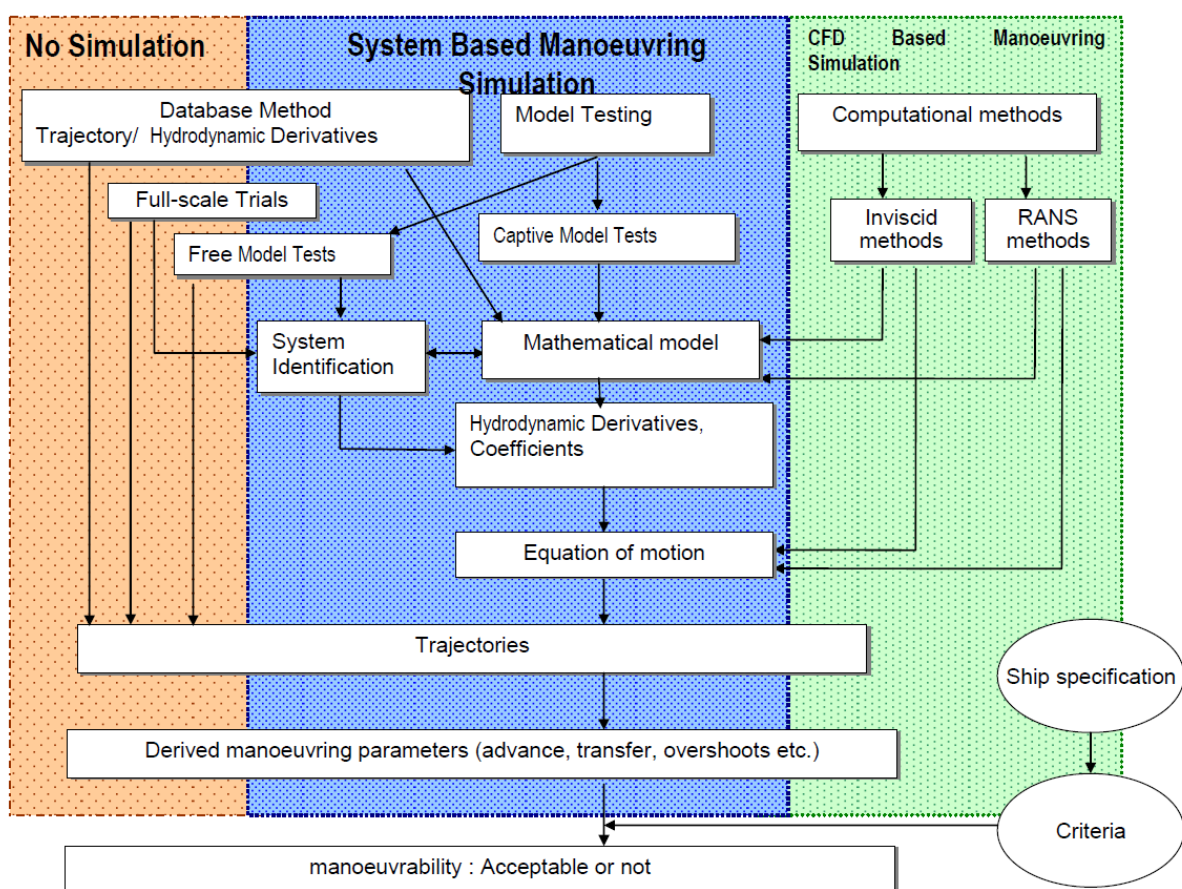
Die viskose Berechnung der turbulenten Vermischungsvorgänge, welche beim Umsteuervorgang in der Umgebung des Propellers auftreten, erfordert den Einsatz leistungsstarker Rechengittergeneratoren und robuster CFD-Berechnungsverfahren. Aufgrund weltweiter wissenschaftlicher Aktivitäten haben die numerischen Rechenverfahren diesen hohen Stand erreicht. Des Weiteren sind durch zunehmend leistungsfähigere Computer wichtige Voraussetzungen für die Behandlung dieser Fragestellungen vorhanden.

### **Manövrierfähigkeit von Schiffen**

Die IMO und die Klassifikationsgesellschaften, die sich für die Sicherheit des Schiffsverkehrs auf den Weltmeeren verpflichtet zeichnen, haben insbesondere im letzten Jahrzehnt eine Vielzahl von Vorschriften erlassen bzw. Resolutionen der IMO in Vorschriften gefasst, um die Anzahl der

Schiffsunfälle zu verringern. Es sei an dieser Stelle auf den International Safety Management Code (ISM Code) [13] und die Vorschriften des Germanischen Lloyd [14] verwiesen.

Das Manövrierverhalten von Schiffen im Projektstadium zu bestimmen ist eine der Kernaufgaben von Schiffbau-Versuchsanstalten. Die Möglichkeiten, die zur Verfügung stehen, gehen über Kraftmessungen, numerische Berechnungen bis hin zum Versuch mit dem freifahrenden Modell. Abbildung 15 illustriert die Möglichkeiten, das Manövrierverhalten eines Schiffes zu bestimmen. Es spielt nicht nur die Frage der Versuchsmethode und der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Großausführung eine große Rolle, sondern auch die Frage nach dem Einfluss der Schiffsform und der Rudergeometrie auf das Manövrierverhalten.



**Abbildung 15: Überblick zur Bestimmung des Manövrierverhaltens von Schiffen [15]**

Für die Untersuchung der Stoppcharakteristik eines Schiffes werden überwiegend freifahrende Modellversuche durchgeführt. Der Grund liegt in dem höchst dynamischen Prozess eines Stoppmanövers, der sich nur schwierig durch indirekte Methoden simulieren lässt und in dem Propellereigenschaften (Drehzahländerung bzw. Steigungsänderung) und Maschinendynamik entscheidende Einflussfaktoren sind.

Die Steigungsänderung für Verstellpropeller wird im Modellversuch im Allgemeinen durch Drehzahländerung von Festpropellern simuliert. Dabei wird die Drehzahl abhängig vom maximal zulässigen Drehmoment bzw. der Maschinendynamik geändert. Die Änderung der

Propellercharakteristik eines Verstellpropellers durch Steigungsänderung kann damit nur bedingt abgebildet werden. Für stark verstellte Flügel haben Verstellpropeller ein gänzlich anderes Verhalten als Festpropeller mit reduzierter Drehzahl. So ist der Stoppweg für Schiffe mit Verstellpropellern im Allgemeinen kürzer als für Schiffe mit Festpropellern [16].

Eine Optimierung des Stoppweges unter Berücksichtigung der Kombination dieselektrischer Antriebe mit Verstellpropellern ist im Versuchswesen nach derzeitigem Stand nur über Umwege möglich, da weltweit keine im Prozess verstellbaren Modellpropeller verfügbar sind und eingesetzt werden. Dieses ist mit dem nun entwickelten System erstmals möglich.

### **Übertragbarkeit von Modellversuchsergebnissen auf die Großausführung**

Die Übereinstimmung der aus den Modellversuchen ermittelten und über das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz auf die Großausführung übertragenen Daten mit den Probefahrtergebnissen des Schiffes ist zumeist zufriedenstellend. Gerade bei Stoppmanövern hat man jedoch größere Abweichungen zwischen Modellversuch und Großausführungsmessung festgestellt. Grund dafür sind die dominanten, instationären viskosen Effekte während eines Stoppmanövers [17].

### **Verstellpropeller**

Zur experimentellen Untersuchung von Verstellpropellern werden die Einzelflügel am Modellpropeller zumeist mit einer geteilten Nabe mechanisch geklemmt. Das Ausrichten der Flügel und der Klemmvorgang kann, abhängig von den Genauigkeitsansprüchen und der Flügelzahl, bis zu zwei Stunden in Anspruch nehmen. Die Steigung der Flügel wird mittels Anbohrmaschinen (x-y-Abtastsystem) eingestellt und manuell fixiert. Die Flügelsteigung ist dann festgesetzt und kann während des Versuchs nicht geändert werden. Um diesen Nachteil zu beseitigen, ist das Verstellpropellersystem entwickelt worden.



**Literatur aus der SVA**

- [SVA1] Labes, K.-H.  
Untersuchungen zum Manövrierverhalten von Schiffen  
DDR-Schiffbau-Information 7 (1975) 13/14
- [SVA2] Koslowski, B.  
Abschätzung der Drehkreisparameter und Drehpunktlagen gegebener Schiffe sowie  
Vergleich mit Meßwerten  
Schiffbauforschung 15 (1976) 3/4
- [SVA3] Koslowski, B.; Labes, K.-H.  
Bestimmung von Kenngrößen zur Beurteilung der Steuerbarkeit von Schiffen  
DDR-Schiffbau-Information 8 (1976) 13/14
- [SVA4] Labes, K.-H.  
Einflußfaktoren auf das Manövrierverhalten großer Fischereifahrzeuge  
Schiffbauforschung 18 (1979) 5/6
- [SVA5] Labes, K.-H.; Koslowski, B.  
Untersuchungsmöglichkeiten zum Manövrierverhalten von Schiffen  
DDR-Schiffbau-Information 11 (1979) 9
- [SVA6] Labes, K.-H.  
Schlängelmanöver mit dem Modell eines Hecktrawlers  
Schiffbauforschung 19 (1980) 4
- [SVA7] Labes, K.-H.  
Zur Aussagefähigkeit von Manövrierkennziffern aus Modellversuchen  
Schiffbauforschung 25 (1986) 1
- [SVA8] Labes, K.-H.  
Einfluß von Propeller und Ruder auf die Propulsionskennziffern von  
Einschraubenschiffen  
Schiffbauforschung 27 (1988) 1
- [SVA9] Labes, K.-H.  
Die Abhängigkeit der Manövriereigenschaften eines Containerschiffes vom  
Beladungszustand und von der Geschwindigkeit  
Schiffbauforschung 34 (1995) 1
- [SVA10] Labes, K.-H.  
Einfluß der Heckform auf die Manövriereigenschaften eines Containerschiffes  
3. SVA - Forum „Manövrieren mit Modell und Großausführung“, Potsdam, 11. Okt.  
1995

- [SVA11] Koslowski, B.  
Systemidentifikation als Methode der experimentellen Schiffshydrodynamik  
3. SVA - Forum „Manövrieren mit Modell und Großausführung“,  
Potsdam, 11. Okt. 1995
- [SVA12] Weede, H.  
Systemidentifikation manövrierender Schiffsmodele  
Schiff & Hafen 2/2002
- [SVA13] Heinke, H.-J., Rieck, K., Steinwand, M.  
Hocheffektive Ruder  
9. Schiffbautag, Rostock, 26. Oktober 2005
- [SVA14] Labes, K.-H.  
Vergleich der Manöviereigenschaften nach Modell- und Großversuch  
Schiff & Hafen (1994) 5
- [SVA15] Wittstock, S.; Seifert, H.  
Konstruktion, Bau und Erprobung einer Meßnabe zur Ermittlung von  
Flügelverstellmomenten an Verstellpropellerflügeln  
DDR-Schiffbau-Information 8 (1976) 13/14
- [SVA16] Selke, W.  
Experimentelle Bestimmung der hydrodynamischen Flügelverstellmomente von  
Verstellpropellern. Schiffbauforschung 23 (1984) 3
- [SVA17] Heinke, H.-J.  
Investigations about the forces and moments at podded drives  
The First International Conference on "Technological Advances in Pod Propulsion"  
14th-16th April 2004 in Newcastle upon Tyne, UK
- [SVA18] Anschau, P., Lamprecht, M., Mach, K.-P., Rieck, K.  
Numerische und experimentelle Untersuchung eines Propellers in 4 Quadranten  
102. STG Jahreshauptversammlung, Berlin 23. Nov. 2007
- [SVA19] Rieck, K.  
Untersuchung der Umströmung von Schiffspropellern im Bereich von vier Quadranten  
BMW-Statusseminar, Rostock, 13. Dezember 2007

## **Fachliteratur**

- [1] Wagner, K.  
Zur Hydrodynamik des Schraubenpropellers bei Umsteuerbetriebszuständen  
Schiffbauforschung 13, Heft 3/4, 1974
- [2] Lerbs, H.  
Ergebnisse der angewandten Theorie des Schiffspropellers  
STG-Jahrbuch, 49. Band, 1955

- [3] Kerwin, J. E., Keenan, D. P., Black, S. D., Diggs, J. G.  
A coupled viscous/potential flow design method for wake-adapted Multi-stage, Ducted Propulsors using Generalized Geometry  
SNAME Transactions, Vol. 102, 1994
- [4] Bednarzik, R.  
Methode zur Berechnung der hydrodynamischen Flügelverstellmomente von Verstellpropellern unter Berücksichtigung von Kavitationseinflüssen  
Schiffbauforschung 19, Heft 1, 1980
- [5] Haack, T.; Krüger, S.  
Propulsion Plant Models for Nautical Manoeuvre Simulations  
COMPIT 2004, Madrid 2004
- [6] Haack, T.  
Simulation des Manövrierverhaltens von Schiffen unter besonderer Berücksichtigung der Antriebsanlage  
Dissertation, TUHH, 2006
- [7] Haack, T.; Krüger, S.  
A new concept for the simulation of extreme manoeuvres in an early design stage  
MANOEUVERING 2005, Gdansk 2005
- [8] Pronk, C.  
Blade Spindle Torque and Off-design Behaviour of Controllable Pitch Propellers  
Dissertation, TU Delft, Juni 1980
- [9] Abdel-Maksoud, M., Brandt, H., Nowacki, H.  
Numerical computation of resistance, thrust deduction and wake fraction using a viscous-flow approach  
Ship Technology Research, Vol. 41, 1994
- [10] Abdel-Maksoud, M., Bschröer, S., Scheuerer, G.  
Numerische Berechnung der viskosen Strömung um einen rotierenden Propeller  
STG Jahrbuch, 89. Band, 1995
- [11] Abdel-Maksoud, M., Menter, M., Scheuerer, G.  
Numerische und experimentelle Untersuchungen der viskosen Strömung um einen Skew-Propeller  
STG Jahrbuch, 90. Band, 1996
- [12] Jessup, S. D.  
Propeller Blade Flow Measurement Using LDV  
ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Lake Tahoe, Nevada, June 1994
- [13] IMO Resolution A 741 (18)

- [14] New Rules for Redundant Propulsion and Steering System  
Germanischer Lloyd, Hamburg, 28. August 2000
- [15] ITTC  
The Manoeuvring Committee – Final Report and Recommendations to the 25th ITTC  
Proceedings of the 25<sup>th</sup> ITTC – Volume I, Fukuoka, 2008
- [16] Kranert, K.  
Übersicht über die Probleme und die Rechenverfahren beim Stoppvermögen von Schiffen  
Technische Universität Hamburg-Harburg, Bericht Nr. 136, November 1964
- [17] ITTC  
Testing and Extrapolation Methods Manoeuvrability – Free Running Model Tests  
Recommended Procedures and Guidelines of the 25<sup>th</sup> ITTC – Volume I, Fukuoka, 2008

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im FuE-Vorhaben wurde mit den Projektpartnern Blohm & Voss Naval GmbH (jetzt thyssenkrupp Marine Systems GmbH), Technische Universität Hamburg-Harburg (jetzt Technische Universität Hamburg) und der Siemens AG zusammengearbeitet.

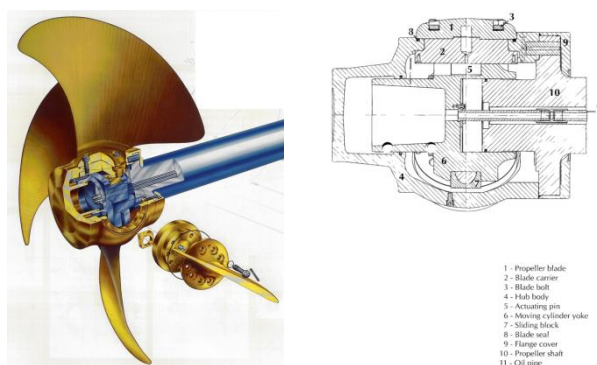
## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Ergebnisse des FuE-Vorhabens

- **Verstellpropellersystem**

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung von Kräften und Momenten auf Verstellpropeller während eines Stoppvorgangs. Die im Modellversuchswesen verwendeten Verstellpropellersysteme ermöglichen nur eine statische Einstellung der Flügelsteigung  $P/D$ . D.h. die Flügelsteigungen werden standardmäßig vor dem Versuch fest eingestellt und sind während des Versuchs nicht veränderbar. Für die Durchführung von Stoppversuchen mit dynamischer Änderung der Propellersteigung musste daher ein neues Verstellpropellersystem entwickelt werden, dass eine Verstellung der Flügelsteigung auch während des Versuchs ermöglicht.

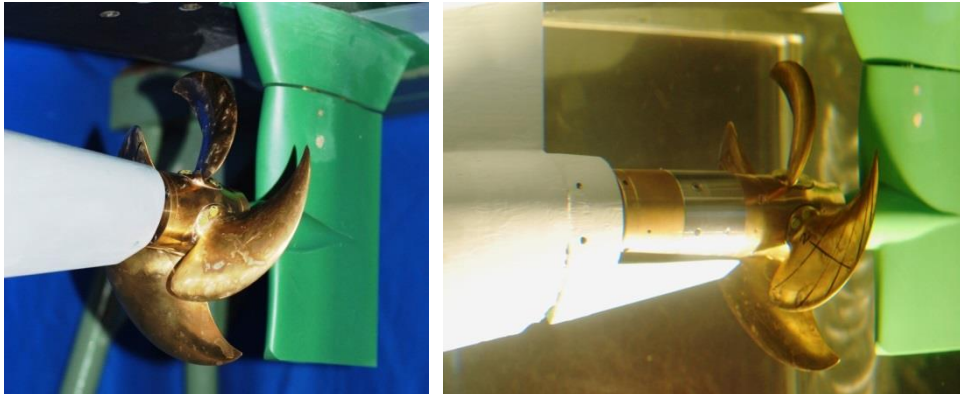
Die Nabe eines Verstellpropellers in der Großausführung ist ein kompaktes hydraulisches System (Abbildung 16). Für den Laborversuch musste dieses im Modellmaßstab durch ein mechanisch-elektrisches System ersetzt werden.



**Abbildung 16: Aufbau eines Verstellpropellers in der Großausführung (Quelle: Wärtsilä)**

Eine wesentliche Forderung an das mechanisch-elektrische System ist, dass es mit dem Propeller mitrotieren muss, damit eine dynamische Steigungseinstellung möglich ist.

Aus den Erfahrungen der SVA mit konventionellen Modellpropellern und Flügelmomentenmessungen am Propeller (siehe auch Abbildung 17) lagen die Fokusse der Umsetzung beim Platzbedarf der Mechanik/Elektrik und bei der Befestigung des Propellers an der Welle.

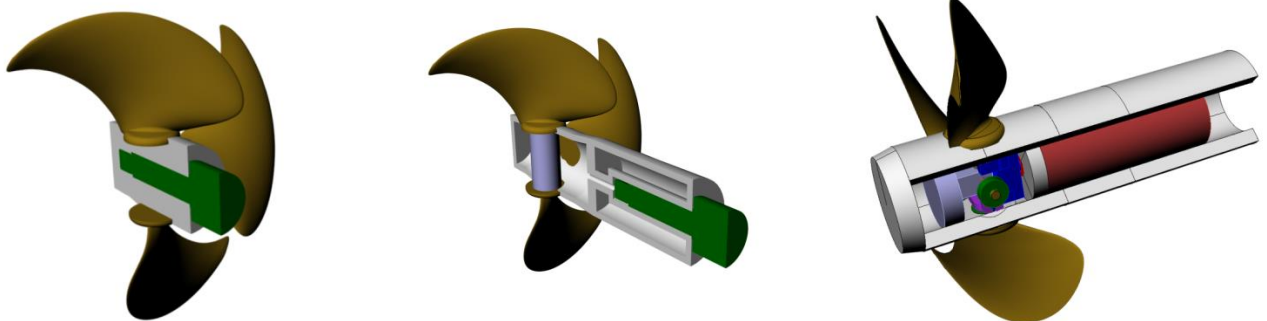


Konventionelle Aufnahme des Propellers auf der Dynamometerwelle

Propellernabe muss ein Messglied aufnehmen, Mitnahme des Propellers durch einen Zusatzkörper

**Abbildung 17: Aufbau eines Verstellpropellers in der Großausführung (Quelle: Wärtsilä)**

Abbildung 18 zeigt die Schritte, die zur Konstruktion des Verstellpropellersystems aus den vorhandenen konventionellen Verstellpropellern führten. Die Aufnahme des konventionellen Verstellpropellers direkt auf der Dynamometerwelle/Propellerwelle ist die Standardanordnung in der SVA und in fast allen Versuchsanstalten weltweit. Bei Verwendung von Nicht-Standard-Propellern oder Nicht-Standard-Wellen werden Adapter für die Mitnahme der Propeller verwendet. Als Adapter mit eingebautem mechanisch-elektrischen System sollte auch das Verstellpropellersystem konstruiert werden.



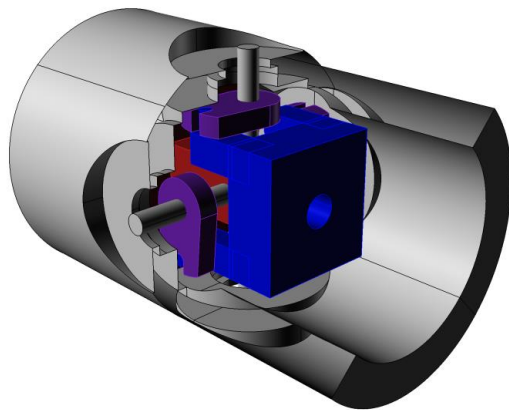
Aufnahme des Propellers auf der Dynamometerwelle

Mitnahme des Propellers durch einen Adapter

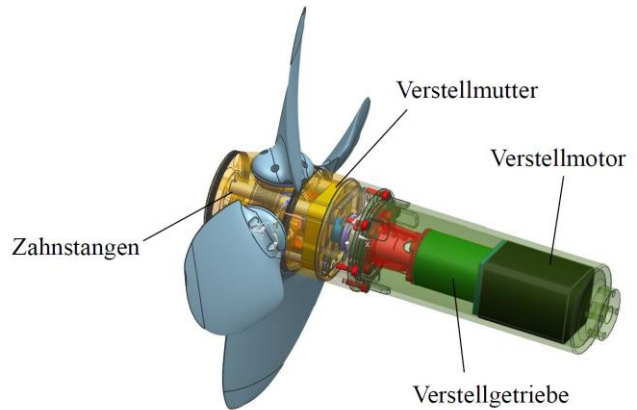
Mitnahme des Propellers mit Elektromotor in der Nabe durch einen Adapter

**Abbildung 18: Schritte zur Konstruktion des Verstellpropellersystems**

Für die Entwicklung waren drei Konstruktionsstufen vorgesehen. Ein erster Entwurf sollte überprüft werden und gegebenenfalls gänzlich neu entworfen bzw. optimiert werden. Dieses Vorgehen hat sich als richtig herausgestellt, da sich der erste Entwurf für die Bedingungen des Modellversuchs als ungeeignet erwiesen hat. Mit den Erfahrungen des ersten Entwurfs wurde der zweite Entwurf erstellt (Abbildung 19).



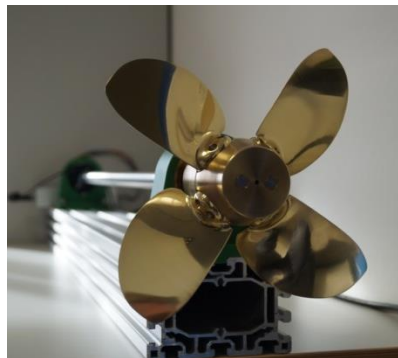
Erster Entwurf



Zweiter Entwurf

**Abbildung 19: Entwürfe des Verstellpropellersystems**

Der zweite, optimiert Entwurf (Abbildung 20) wurde gefertigt und konnte nach entsprechenden Tests und Anpassungen in den Versuchsbetrieb übernommen werden.

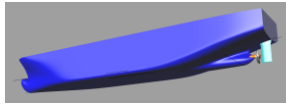


**Abbildung 20: Gefertigtes Verstellpropellersystem**

- **Propellerentwurf und Fertigung**

Für vier im Verbundprojekt zu untersuchende Schiffsformen hat die SVA Potsdam vier Propellergeometrien entworfen (Abbildung 21). Die Propeller des Feeder-Einschraubers und des ULVC (DTC)-Einschraubers wurden von gegebenen Festpropellern neu als Verstellpropeller entworfen, um diese für das Projekt verwenden zu können. Der Propeller des RoPax-Einschraubers Spaaneborg wurde aus gegebenen 2-Daten extrahiert und in 3D neu aufgebaut und entworfen. Die Propellergeometrie des Zweischraubers wurde in Abstimmung mit dem Projektpartner TKMS ausgewählt und entworfen.

Feeder –  
Einschrauber



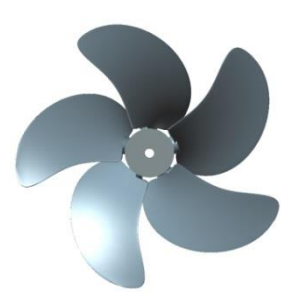
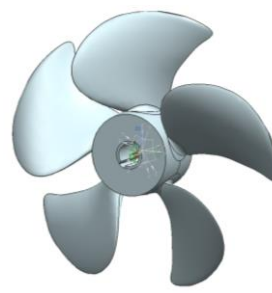
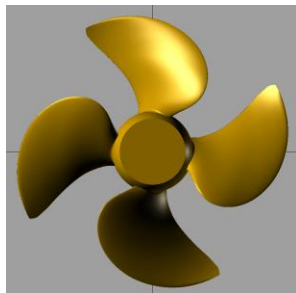
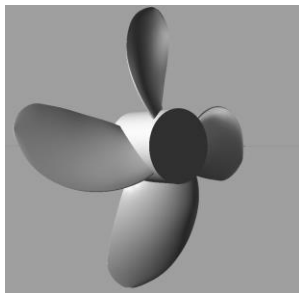
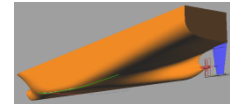
RoPax –  
Einschrauber  
Spaarneborg



Zweischrauber



ULCV (DTC) –  
Einschrauber



**Abbildung 21: Im Verbundprojekt entworfene und verwendete Propellergeometrien**

Von den vier Geometrien sind zwei für die Laboruntersuchungen (4-Quadrantenmessungen, Stoppversuche) in der SVA gefertigt worden (Abbildung 22).



VP1143/VPS1697



VP1723

**Abbildung 22: Gefertigte Propellergeometrien**

- **4-Quadrantenmessungen**

Zur Entwicklung und Validierung des Simulationsverfahrens des Projektpartners TUHH war eine Datenbasis notwendig. Diese Daten wurden unter anderen in systematischen Versuchen mit dem freifahrenden Verstellpropeller erarbeitet. Die SVA Potsdam führte die Validierungsversuche in enger Abstimmung mit den Projektpartnern durch.

**Vorbetrachtungen**

Der Propeller generiert einen axial gerichteten Strahlimpuls durch die als Tragflügel arbeitenden Propellerflügel. Dem durch den Propeller bewirkten Impulszuwachs oder -verlust entspricht eine Schub- bzw. Bremswirkung [1].



Mit dem Propeller kann durch die Änderung der Drehzahl und die Umkehrung der Drehrichtung oder durch die Änderung der Steigung die Größe und Richtung des Schubes beeinflusst werden. Mit Hilfe des Propellers kann das Schiff in stationären Fahrtzuständen gehalten, beschleunigt, abgebremst oder einem Fahrtrichtungswechsel unterworfen werden [1]. Die dabei auftretenden Betriebszustände des Propellers können in folgende Bereiche unterteilt werden:

- Vorwärtsfahrt ( $V > 0, n > 0$ )  $\beta_{0.7} = 0^\circ$  bis  $45^\circ$
- Stoppen 1 bei Fahrt voraus ( $V > 0, n > 0$ )  $\beta_{0.7} = 45^\circ$  bis  $90^\circ$
- Stoppen 2 bei Fahrt voraus ( $V > 0, n < 0$ )  $\beta_{0.7} = 90^\circ$  bis  $135^\circ$
- Stoppen 3 bei Fahrt voraus ( $V > 0, n < 0$ )  $\beta_{0.7} = 135^\circ$  bis  $180^\circ$
- Fahrt zurück ( $V < 0, n < 0$ )  $\beta_{0.7} = 180^\circ$  bis  $225^\circ$
- Stoppen 1 bei Fahrt zurück ( $V < 0, n < 0$ )  $\beta_{0.7} = 225^\circ$  bis  $270^\circ$
- Stoppen 2 bei Fahrt zurück ( $V < 0, n > 0$ )  $\beta_{0.7} = 270^\circ$  bis  $315^\circ$
- Stoppen 3 bei Fahrt zurück ( $V < 0, n > 0$ )  $\beta_{0.7} = 315^\circ$  bis  $360^\circ$

Die Kennwerte des Propellers werden durch einen Schub- und Momentenbelastungsgrad als Funktion des geometrischen Fortschrittswinkels dargestellt.

Fortschrittswinkel  $\beta_{0.7} = \arctan\left(\frac{V_A}{0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D}\right)$

Schubbelastungsgrad  $C_T^* = \frac{T}{0.5\rho \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot (V_A^2 + (0.7 \cdot D \cdot \pi \cdot n)^2)}$

Momentenbelastungsgrad  $C_Q^* = \frac{Q}{0.5\rho \cdot \frac{\pi}{4} D^3 \cdot (V_A^2 + (0.7 \cdot D \cdot \pi \cdot n)^2)}$

Zwischen den sonst üblichen Propellerkennwerten  $K_T, K_Q, C_T, C_Q$  und  $J$  und den Kennwerten für die 4-Quadrantenauswertung bestehen folgende Beziehungen.

Fortschrittswinkel  $\beta_{0.7} = \arctan\left(\frac{J}{0.7\pi}\right)$

Schubbelastungsgrad  $C_T^* = \frac{K_T}{J^2 + (0.7\pi)^2} = \frac{C_T}{1 + (0.7\pi)^2 \cdot (1/J)^2}$

Momentenbelastungsgrad  $C_Q^* = \frac{K_Q}{J^2 + (0.7\pi)^2} = \frac{C_Q}{1 + (0.7\pi)^2 \cdot (1/J)^2}$

mit  $J = \frac{V}{n \cdot D}$

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \qquad C_T = \frac{T}{\rho \cdot V^2 \cdot D^2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \qquad C_Q = \frac{Q}{\rho \cdot V^2 \cdot D^3}$$

**Arbeitsbereiche von Fest- und Verstellpropellern**

Beim Festpropeller muss für einen vollständigen Übergang von stationärer Vorausfahrt (VV) über stationäre Rückwärtsfahrt (VZ<sub>FP</sub>) bis zu wieder stationärer Vorausfahrt (VV) der gesamte Fortschrittswinkelbereich  $\beta_{0,7}$  auf der Kurve  $P/D = \text{konst.}$  durchlaufen werden (Abbildungen 23 und 24). Beim Umsteuern mit dem Festpropeller ist der Bereich des nahezu stillstehenden Propellers ( $n \approx 0$ ) zu beachten, bei dem mit abgelöster Strömung am Propeller gerechnet werden muss.

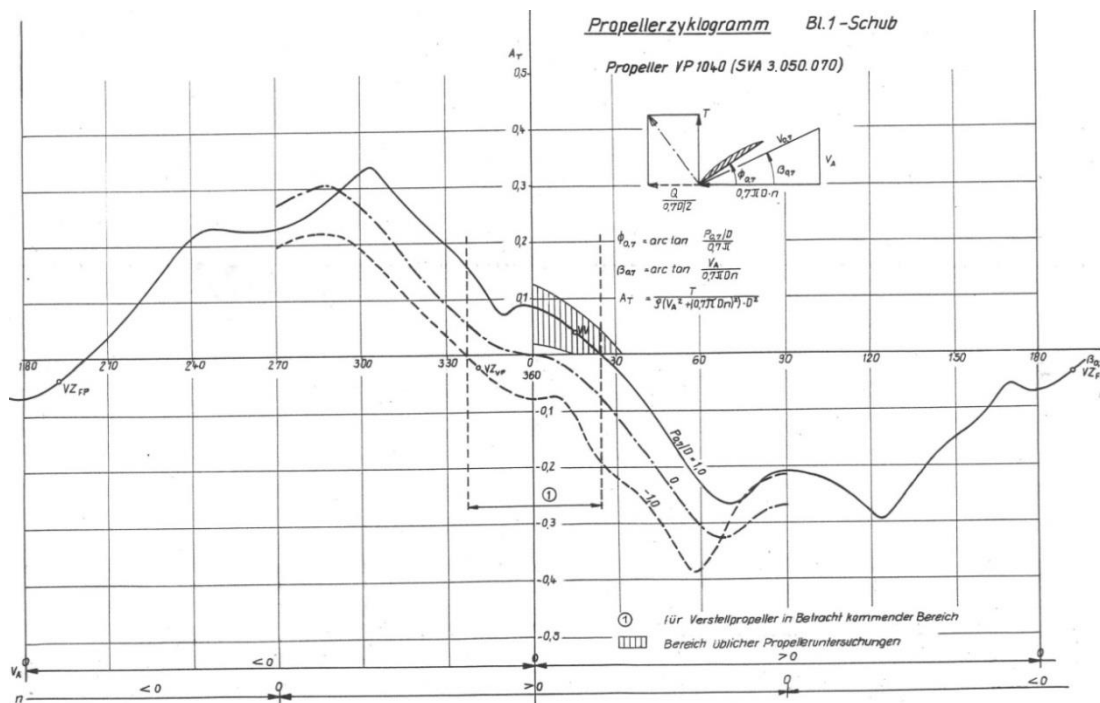
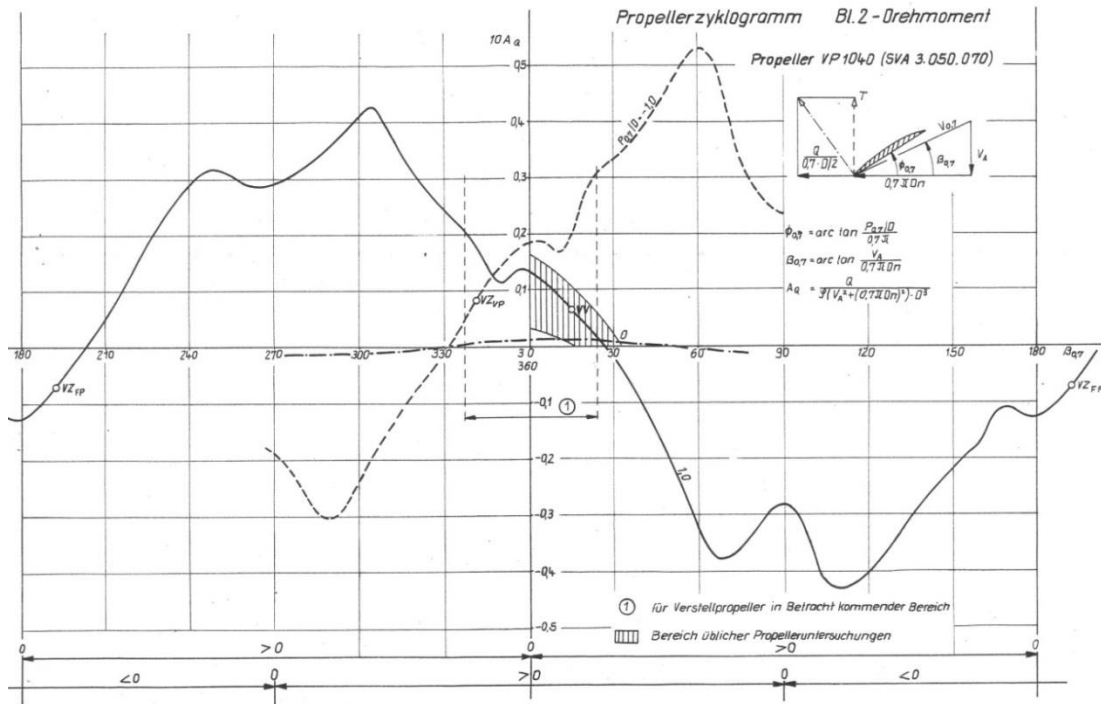


Abbildung 23: Propellerzyklogramm, Schubbelastungsgrad [1]



**Abbildung 24: Propellerzyklogramm, Momentenbelastungsgrad [1]**

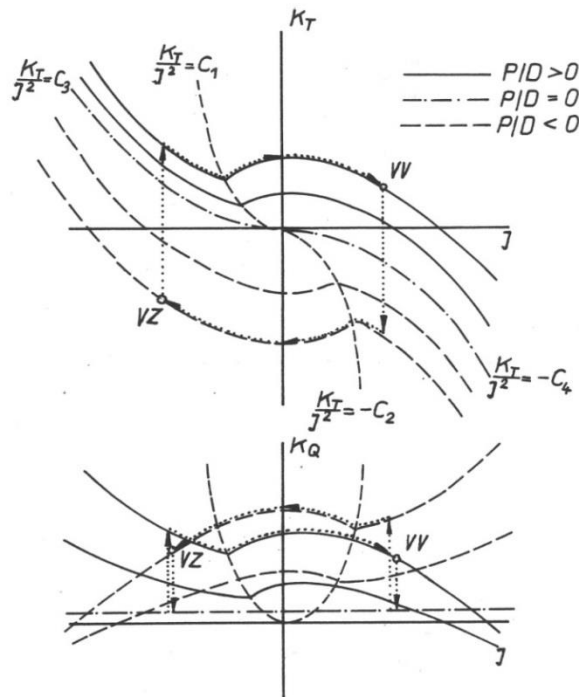
Beim Festpropeller ergeben sich für einen kompletten Umsteuervorgang folgende Parametervariationen:

Festpropeller mit $P/D > 0$	$V_A > 0, n > 0$
	$V_A > 0, n < 0$
	$V_A < 0, n < 0$
	$V_A < 0, n > 0$

Beim Verstellpropeller wird nur der Bereich des Fortschrittswinkels bei stationärer Voraussfahrt (VV) über  $\beta_{0.7} = 0^\circ$  bis zum Fortschrittswinkel bei stationärer Rückwärtsfahrt (VZ<sub>VP</sub>) überstrichen (Abbildungen 23 und 24). Der Umsteuervorgang des Verstellpropellers ist verbunden mit dem Übergang von einer positiven auf eine negative Steigung und umgekehrt (Abbildung 25).

Folgende Parametervariationen sind beim Verstellpropeller möglich:

Verstellpropeller mit $n > 0$	$V_A > 0, P/D > 0$
	$V_A > 0, P/D < 0$
	$V_A < 0, P/D < 0$
	$V_A < 0, P/D > 0$



**Abbildung 25: Propellerkennfeld im Verstellpropellerbereich [1]**

Beim Umsteuervorgang mit dem Verstellpropeller treten in den Off-Design Punkten Kraft- und Momentenschwankungen auf, die um das 2- bis 3-fache über den Kräften und Momenten im Entwurfspunkt liegen.

Die Kennwerte der Verstellpropeller VP1143 und VP1723 wurden in 4-Quadranten kavitationsfrei und unter Kavitationsbedingungen ermittelt. Die Messungen sollten für 12 Steigungsverhältnisse der Propeller durchgeführt werden. Die Hauptdaten der Propeller sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Hauptabmessungen der Modellpropeller VP1143 und VP1723**

Bezeichnung		VP1143	VP1723
Propellerdurchmesser	$D$ [m]	0.2400	0.2500
Konstruktionssteigungsverhältnis	$P_{0.7}/D$ [-]	0.8000	0.997
Flächenverhältnis ( $A_E/A_0 = 0.55$ als Festpropeller)	$A_E/A_0$ [-]	0.5185	0.8000
Blattschnittlänge $r/R = 0.7$	$c_{0.7}$ [m]	0.07075	0.08975
effektiver Skewwinkel	$\theta_{EXT}$ [°]	17.48	31.97
Nabendurchmesser Verhältnis (Nabe wurde 'aufgedickt', Original $d_h/D = 0.1875$ )	$d_h/D$ [-]	0.250	0.176
Flügelzahl	$Z$	4	5
Drehrichtung		rechts	rechts
Typ		Wag. B4.55	

Die kavitationsfreien Versuche wurden in der Schlepprinne (280 x 9 x 4.5 m) der SVA durchgeführt. Propellerschub und Drehmoment sowie die Drehzahl wurden mit dem Dynamometer H39 von Kempf & Remmers gemessen. Die Fotos in Abbildung 26 zeigen den Versuchsaufbau.



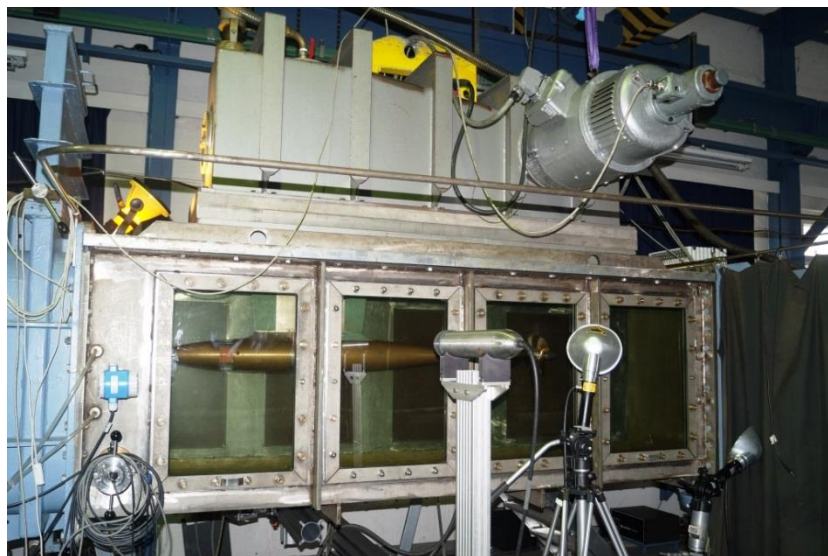
VP1143



VP1723

**Abbildung 26: Versuchsaufbau der 4-Quadrantenmessungen in der Schlepprinne der SVA**

Die 4-Quadrantenmessungen unter Kavitationsbedingungen wurden in der großen Messstrecke (850 x 850 mm) des Kavitationstunnels K15A von Kempf & Remmers durchgeführt. Propellerschub und Drehmoment sowie die Drehzahl wurden mit dem Dynamometer H36 von Kempf & Remmers gemessen. Das Foto in Abbildung 27 zeigt den Versuchsaufbau.



VP1143

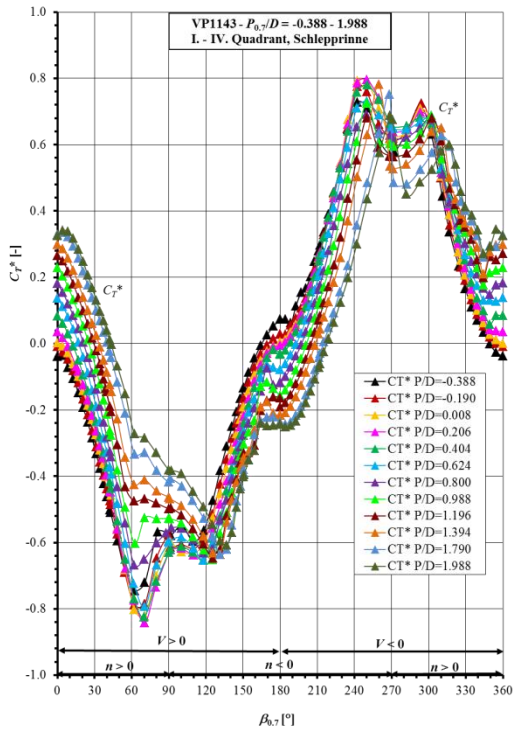
**Abbildung 27: Versuchsaufbau der 4-Quadrantenmessungen im Kavitationstunnel K15A**

Es wurde definiert, dass die Steigung um  $\pm 30^\circ$  von der Ausgangssteigung zu variieren ist. In Tabelle 2 sind die dazu entsprechenden  $P/D$ -Verhältnisse beider Propeller dargestellt.

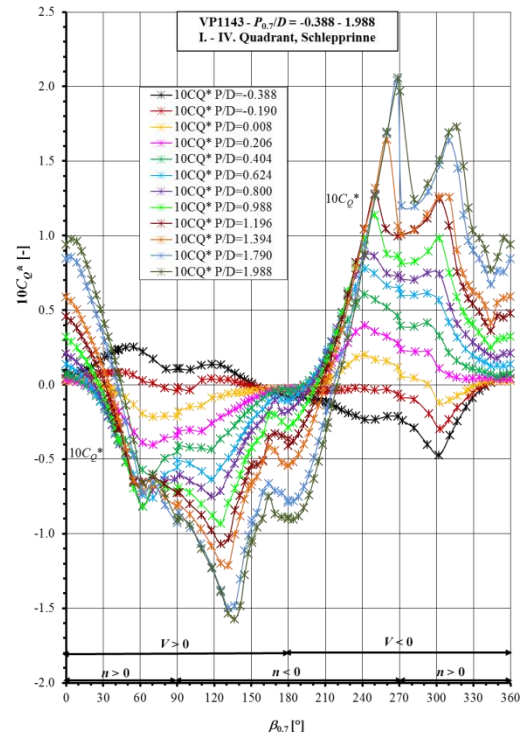
**Tabelle 2: Versuchsumfang für die 4-Quadrantenmessungen (VP1143/VP1723)**

<b>VP1143</b>	<b>VP1723</b>	<b>Bemerkung</b>
<i>P<sub>0.7/D</sub></i>	<i>P<sub>0.7/D</sub></i>	
[-]	[-]	
-0.388	-0.216	Max. Rückwärtsschub
-0.190		
0.008	0.015	Nullschub
0.206	0.246	
0.404	0.483	
0.624	0.731	
0.800	0.997	Designsteigung
0.998	1.289	
1.196	1.620	
1.394	2.007	
1.790	2.475	
1.988	3.070	Max. Vorwärtsschub

Die Ergebnisse der 4-Quadrantenmessungen ohne Kavitation sind in den Abbildungen 28 und 29 dargestellt. Ein Vergleich der Messungen kavitationsfrei und mit Kavitation zeigt, dass die Kavitation keinen Einfluss auf die 4-Quadrantenkurven der beiden untersuchten Propeller hatte (Abbildungen 30). In der Abbildung ist auch das Kavitationsverhalten des Propellers exemplarisch in ausgesuchten Punkten dargestellt.

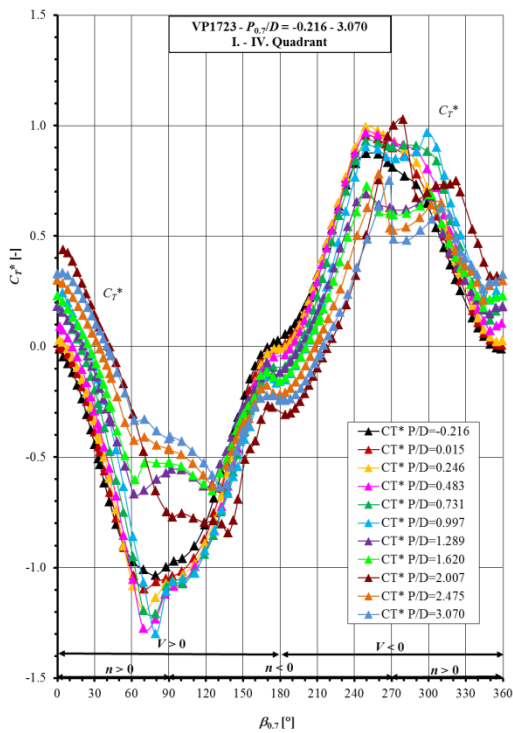


Schubbelastungsgrad  $C_T^*$  VP1143

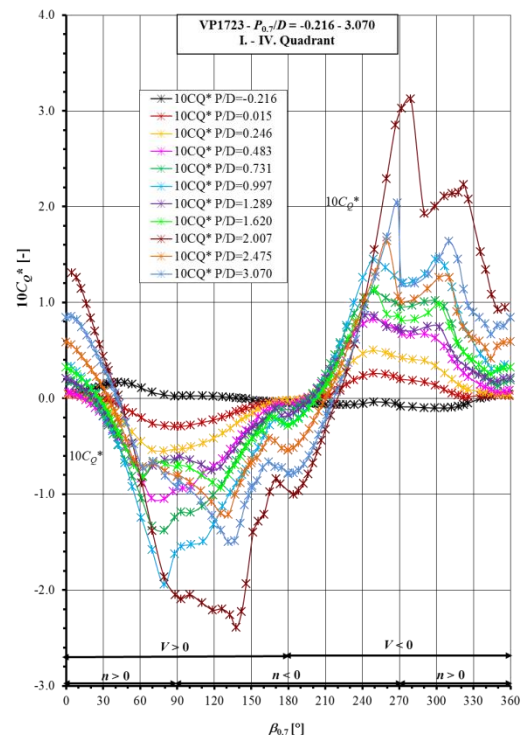


Momentenbelastungsgrad  $C_Q^*$  VP1143

Abbildung 28: Ergebnisse der 4-Quadrantenmessungen ohne Kavitation für VP1143

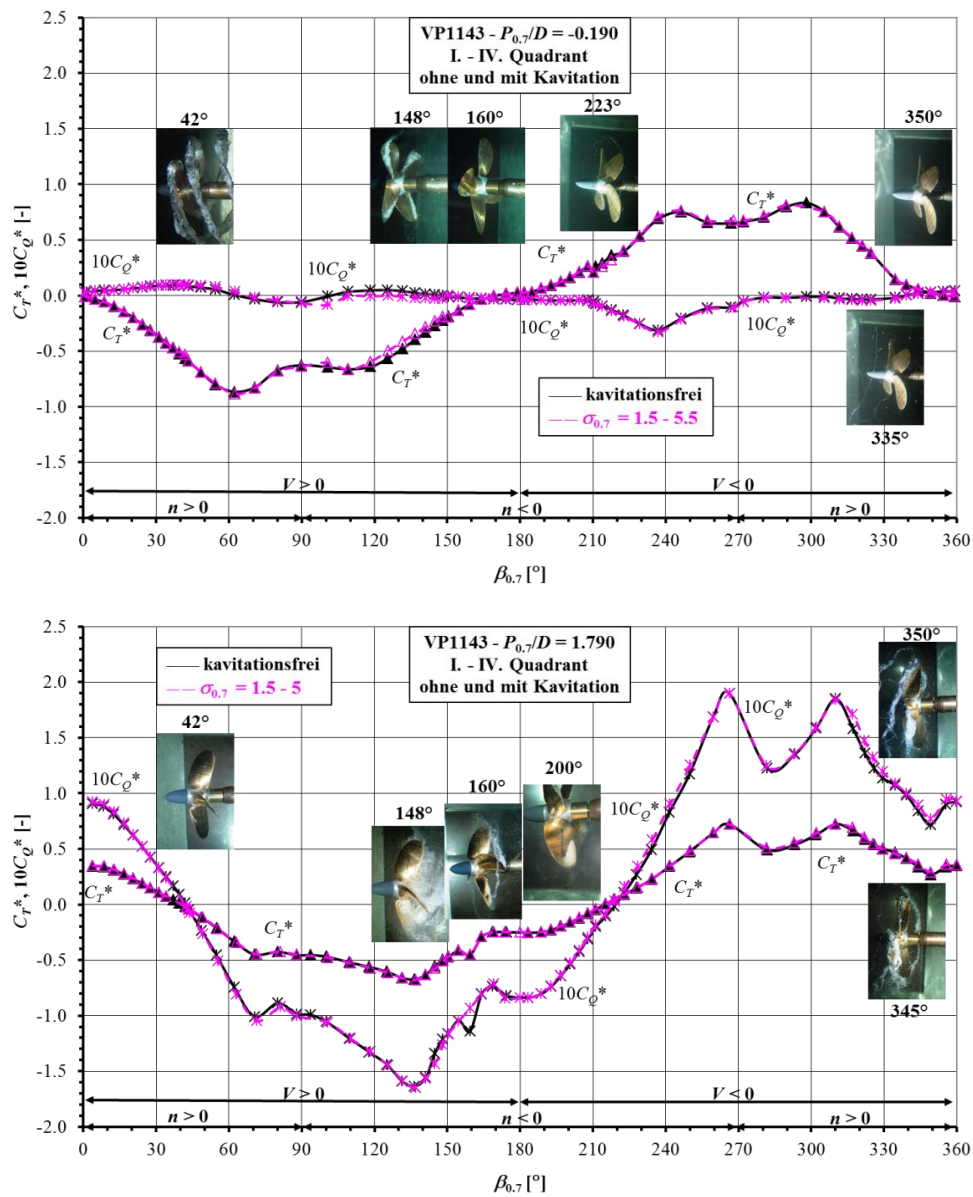


Schubbelastungsgrad  $C_T^*$  VP1723



Momentenbelastungsgrad  $C_Q^*$  VP1723

Abbildung 29: Ergebnisse der 4-Quadrantenmessungen ohne Kavitation für VP1723



**Abbildung 30: Vergleich ausgewählter Ergebnisse der 4-Quadrantenmessungen mit und ohne Kavitation und das Kavitationsverhalten an ausgesuchten Punkten**

- **Modellversuche**

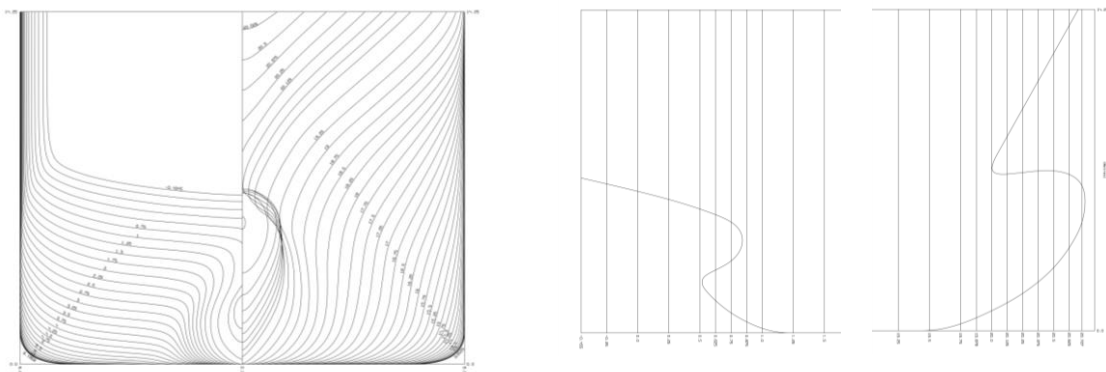
Zur Entwicklung und Validierung des Simulationsverfahrens des Projektpartners TUHH war eine Datenbasis notwendig. Diese Daten wurden unter anderen in systematischen Versuchen mit einem Schiffmodell erarbeitet. Die SVA Potsdam führte die Validierungsversuche in enger Abstimmung mit den Projektpartnern durch. Es waren zudem Vergleichsmessungen des Modells zwischen dem bestehenden System mit fest einstellbaren konventionellen Verstellpropellern und dem neu entwickelten System mit dynamisch verstellbaren Verstellpropellern (Verstellpropellersystem) vorgesehen.



Die Modellversuche zur Ermittlung der Kräfte auf das Schiff und den Propellers können wie folgt unterteilt werden:

- Kraftmessungen über einen Anströmbereich von 360°
- Widerstands- und Propulsionsversuche
- Kraftmessungen am geradeausfahrenden Modell bei Off-Propulsionsbedingungen
- Manövrierversuche und Stoppversuche

Als Schiff wurde das Modell eines Feederschiffes (SVA Modell M1405S001) ausgewählt und gefertigt. Der Spantriss des Schiffes als auch die Vor- und Hinterstevenkontur zeigt Abbildung 31. Das fertige Modell ist in Abbildung 32 dargestellt. Tabelle 3 stellt die Hauptparameter und hydrostatische Daten des Schiffes dar.



**Abbildung 31: Spantriss und Vor- und Hinterstevenkontur von Modell M1405S001**



**Abbildung 32: SVA Modell M1405S001**

### **Kraftmessungen über einen Anströmbereich von 360°**

Es wurden Kraftmessungen an einem Feederschiff, Modell Nr. M1405S001, ohne Propeller und ohne Ruder durchgeführt. Dabei wurden die Schiffskräfte und -momente in der horizontalen Ebene  $F_x$ ,  $F_y$  und  $M_z$  gemessen. Die Untersuchungen wurden für einen Tiefgang und vier Geschwindigkeiten durchgeführt. Aus den gemessenen Kräften wurden die zur Darstellung verwendeten Kraftbeiwerte bestimmt, die wie nachfolgend definiert sind:

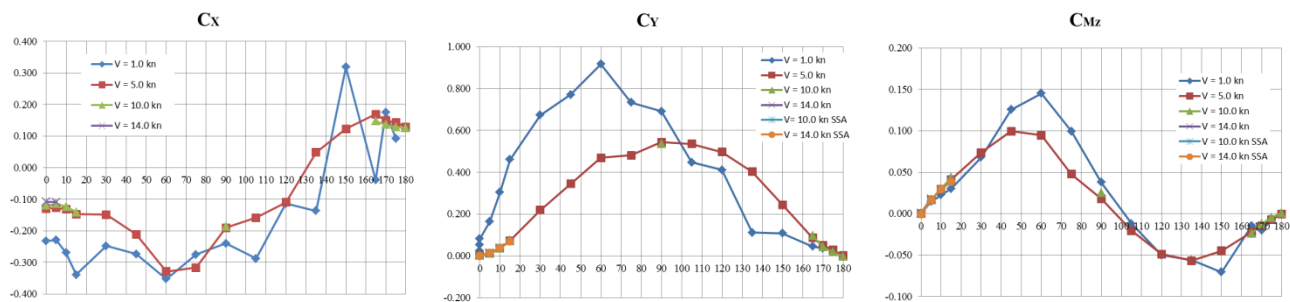
$$C_x = \frac{F_x}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot B \cdot T} \quad C_y = \frac{F_y}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot L_{pp} \cdot T} \quad C_{M_z} = \frac{M_z}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot L_{pp}^2 \cdot T}$$

$F$  ist die gemessene Modellkraft in x- bzw. in y-Richtung,  $M_z$  das Moment um die Modell-z-Achse,  $\rho$  die Dichte des Wassers,  $V$  die Anströmgeschwindigkeit,  $B$  die Breite des Schiffes,  $L$  die Schiffslänge und  $T$  der Tiefgang des Schiffes ist. Das Koordinatensystem des Modells ist dem Teilbericht [A1] zu entnehmen.

**Tabelle 3: Hauptparameter und hydrostatische Daten von Modell M1405S001**

M1405		7.10 m	
$\lambda = 19.2000$		Modell	Schiff
$L_{PP}$	[m]	5.7292	110.00
$L_{OS}$	[m]	6.0742	116.62
$L_{WL}$	[m]	5.8594	112.50
$B$	[m]	0.9375	18.00
$B_{WL}$	[m]	0.9375	18.00
$T_A$	[m]	0.3698	7.10
$T_F$	[m]	0.3698	7.10
$A_X$	[m <sup>2</sup> ]	0.3443	126.91
$A_M$	[m <sup>2</sup> ]	0.3443	126.91
$A_W$	[m <sup>2</sup> ]	4.8770	1797.84
$A_{TR}$	[m <sup>2</sup> ]	0.0030	1.09
$S_{BH}$	[m <sup>2</sup> ]	8.3359	3072.9
$\nabla$	[m <sup>3</sup> ]	1.5381	10887
$AB/L_{PP}$		0.4930	
$L_{PP}/B$		6.1111	
$B/T$		2.5352	
$C_B$		0.7744	
$C_M$		0.9930	
$C_X$		0.9930	
$C_P$		0.7799	
$C_W$		0.9080	
$C_{\nabla}$		8.1793	

Die Ergebnisse der Versuche wurden den Projektpartnern in Form der dimensionslosen Beiwerte übergeben. Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der Kraftmessungen.



**Abbildung 33: Dimensionslose Strömungskraftbeiwerte**

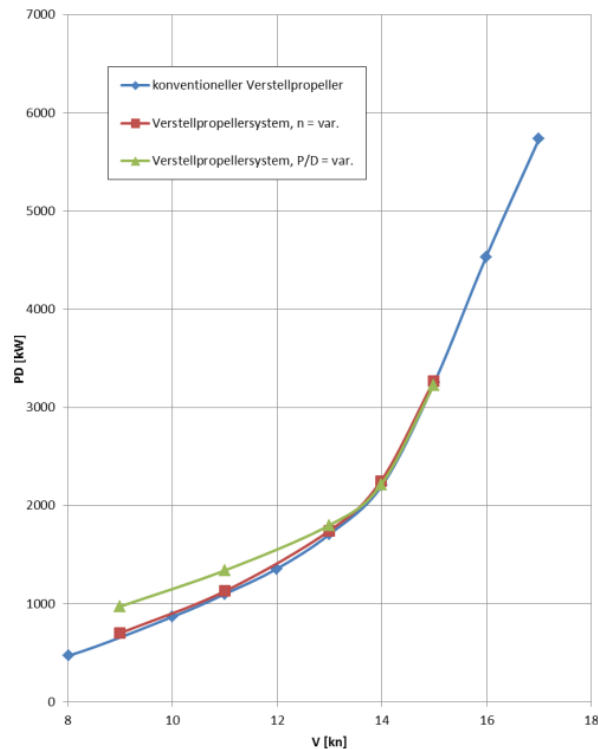
### Widerstands- und Propulsionsversuche

Mit dem Modell M1405S001 wurden Widerstand- und Propulsionsversuche durchgeführt. Es sollte der Leistungsbedarf für die Designgeschwindigkeit bestimmt werden. Zudem sollte ein direkter Vergleich der Propulsionsergebnisse zwischen konventionellem Verstellpropeller und dem neuen Verstellpropellersystem zeigen, dass das neue System den hohen Ansprüchen der SVA an genauen Messwerten genügt und für den Einsatz freigegeben werden kann.

Die Widerstandsversuche wurden mit dem Modell ohne Propeller realisiert. Die Propulsionsversuche wurden nach der Britischen Methode gefahren, d.h. für jede Geschwindigkeit wurde die Propellerdrehzahl variiert und die verbleibende Restkraft am Modell gemessen. Für die Restkraft, die dem ausgerechneten Reibungsabzug entspricht, wurden dann die Werte für Schub, Drehmoment und Drehzahl interpoliert.

Während der Versuche konnte das Modell frei trimmen und tauchen. Die dynamische Vertrimmung des Modells wurde mit Potentiometern an Spant 0 und Spant 20 gemessen. Der Trimmwinkel ist negativ definiert bei buglastigem Trimm.

Die vergleichenden Ergebnisse der Propulsionsversuche sind in Abbildung 34 dargestellt. Die Ergebnisse zwischen konventionellem Verstellpropeller und neuem Verstellpropellersystem mit konstanter Steigung und variabler Drehzahl zeigen eine exakte Übereinstimmung.



**Abbildung 34: Ergebnisse der vergleichenden Propulsionsversuche**

Mit dem Verstellpropellersystem ist es nun jedoch auch möglich die britische Methode mit konstanter Drehzahl und variabler Steigung zu fahren. Dieser Versuch wurde auch durchgeführt und dessen Ergebnisse sind im Diagramm durch die grüne Linie illustriert. Es zeigt sich, dass durch die variable Steigung der Wirkungsgrad des Propellers in kleinen Geschwindigkeitsbereichen geringer ist. In Zukunft ist die Durchführung von realistischen Propulsionsversuchen mit Verstellpropellern möglich, die auch den Kombinatormode bei Verstellpropellern (Kombinationen von Drehzahl und Steigungsänderung) berücksichtigen.

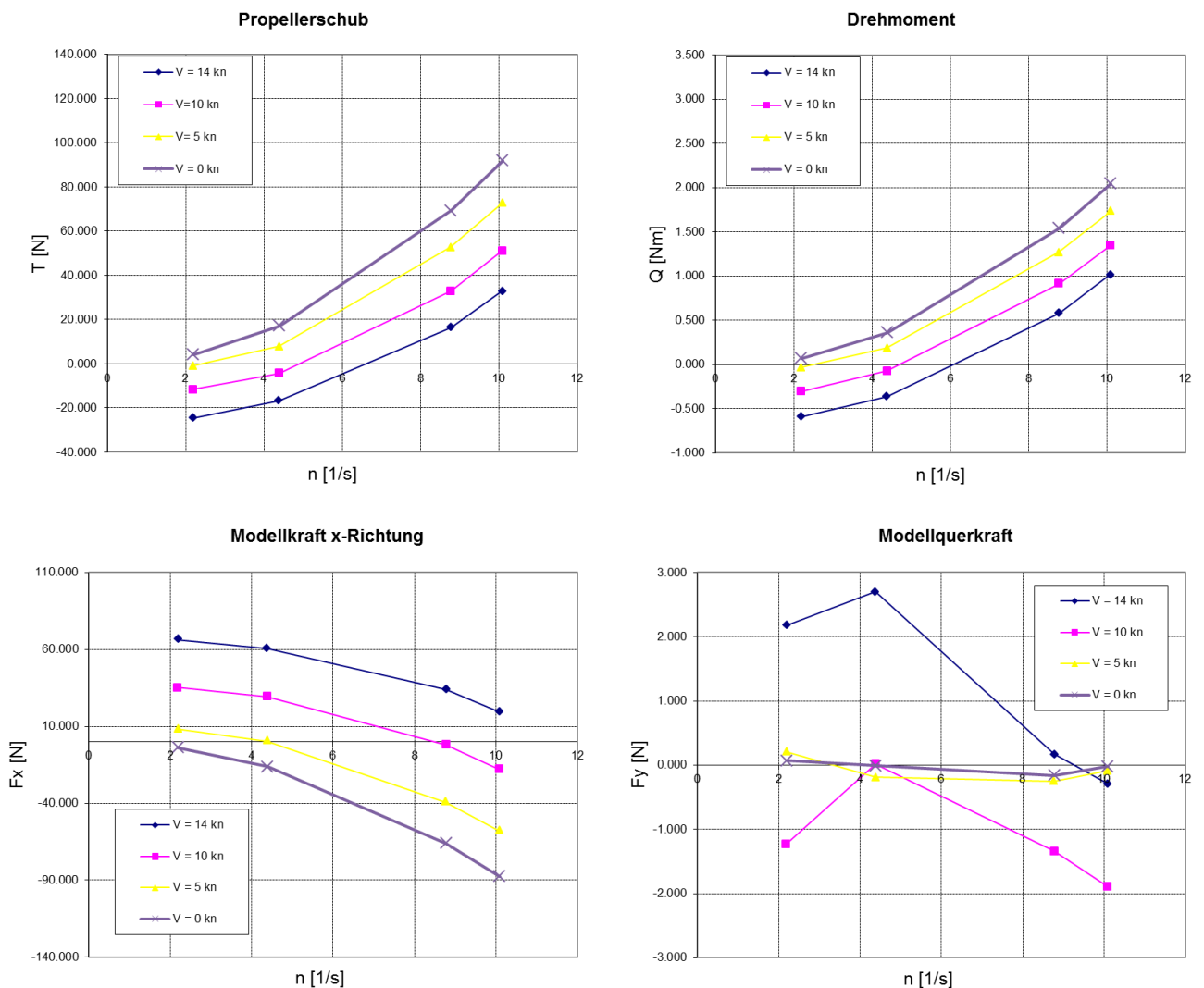
### **Kraftmessungen am geradeausfahrenden Modell bei Off-Propulsionsbedingungen**

Es wurden sog. gefesselte Propulsionsversuche durchgeführt. Dabei handelte es sich um Kraftmessungen bei Vorausfahrt für vier unterschiedliche Modellgeschwindigkeiten, drei unterschiedlichen Propellersteigungen (VP1143) und einer Variation der Propellerdrehzahl. Mit diesen Messungen sollten Kräfte und Momente auf das Schiff, den Propeller und das Ruder während eines Stopp-Vorgangs untersucht werden. Die Ergebnisse dienen den Projektpartnern des Verbundvorhabens zur Validierung ihrer Berechnungen.

Für jede Geschwindigkeit und Propellerdrehzahl wurde die verbleibende Rest- und Querkraft am Modell gemessen. Zudem wurden Propellerschub/ -drehmoment und Drehzahl, sowie die horizontalen Ruderkräfte und -momente gemessen.

Während der Versuche konnte das Modell frei trimmen und tauchen. Die dynamische Vertrimmung des Modells wurde mit Potentiometern an Spant 0 und Spant 20 gemessen. Der Trimmwinkel ist negativ definiert bei buglastigem Trimm.

Beispielhaft sind in Abbildung 35 die Ergebnisse für eine Propellersteigung von  $P/D = 0.6240$  dargestellt. Alle Ergebnisse sind dem Teilbericht A2 zu entnehmen.



**Abbildung 35: Ausgewählte Ergebnisse der Kraftmessungen am geradeausfahrenden Modell bei Off-Propulsionsbedingungen**

### Manövrierversuche und Stoppversuche

Mit dem Modell M1405S001 wurde das Manövrierverhalten anhand von verschiedenen Z-Manövern und Drehkreisen als auch beim Abstoppen untersucht.

Es waren Manövrierversuche für einen Großausführungstiefgang  $T = 7.10$  m bei einer Geschwindigkeit  $V = 14$  kn durchzuführen. Folgende Manöver waren zu untersuchen:

- Drehkreis bei 35° Ruderwinkel
- Z-Manöver 20°/20° und 10°/10°
- Stoppmanöver mit konstanten Reduzierungen der Propellerdrehzahlen und der Propellersteigung

Es wurden folgende Messgrößen während der Versuche aufgezeichnet:

- Modellbeschleunigungen in 3 Freiheitsgraden, Winkel des Modells um die 3 Raumachsen, Position des Modells in der horizontalen Ebene
- Propellerdrehzahl, -schub und Drehmoment
- Ruderwinkel und Kräfte in der horizontalen Ebene

Insgesamt sind vier Versuchsserien durchgeführt worden:

1. Vorversuche mit dem konventionellen Verstellpropellersystem zur Bestimmung des Manövrierhaltens beim Drehkreis und bei Z-Manövern als auch des Stoppverhaltens bei Reduzierung der Drehzahl und konstanter Propellersteigung
2. Stoppversuche in der Schlepprinne der SVA mit dem Verstellpropellersystem. Test und Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem konventionellen Verstellpropellersystem
3. Manövrierversuche (Drehkreis, Z-Manöver, Stoppversuche) mit dem Verstellpropellersystem als Vergleichsmessungen zu den Manövrierversuchen mit dem konventionellen Verstellpropellersystem
4. Stoppversuche in der Schlepprinne der SVA mit dem Verstellpropellersystem zur Validierung der rechnerisch ermittelten optimalen Stopp-Strategien für Schiffe mit Verstellpropellersystem

In Abbildung 36 sind die Versuchsanordnungen für die einzelnen Versuchsserien abgebildet.



1. Versuchsserie: Manövrierversuche



2. Versuchsserie: Stoppversuche



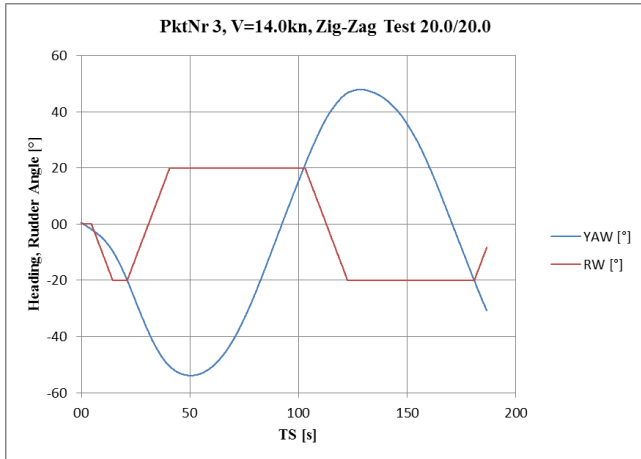
3. Versuchsserie: Manövrierversuche



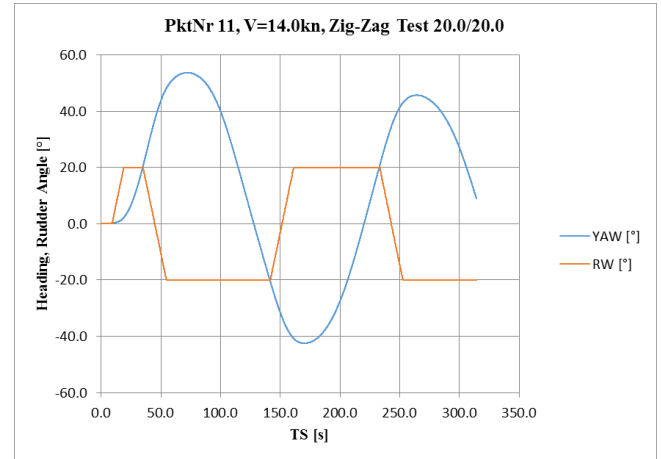
4. Versuchsserie: Stoppmanöver

**Abbildung 36: Versuchsanordnungen der einzelnen Versuchsserien**

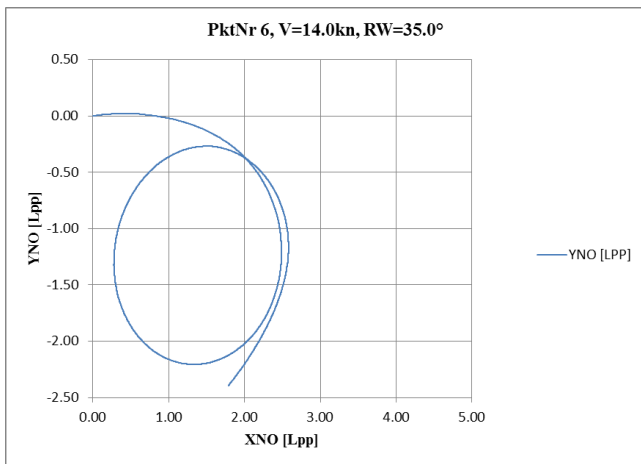
In Abbildung 37 sind beispielhaft die Ergebnisse der Manövrier- und Stoppversuche dargestellt. Die kompletten Versuchsergebnisse sind den Teilberichten A3, A9, A10 und A11 zu entnehmen.



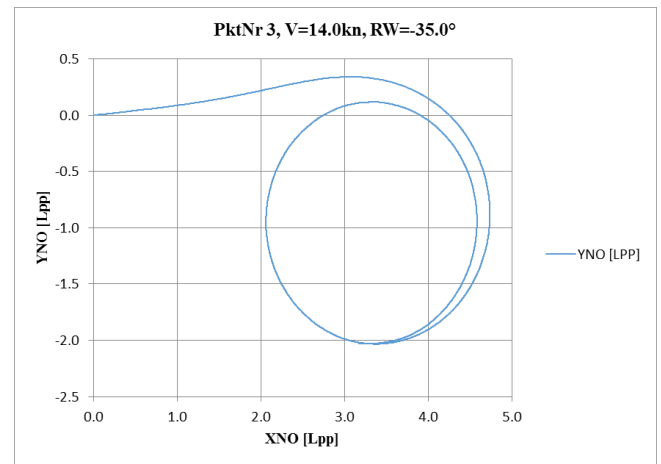
Z-Manöver mit konv. Verstellpropeller



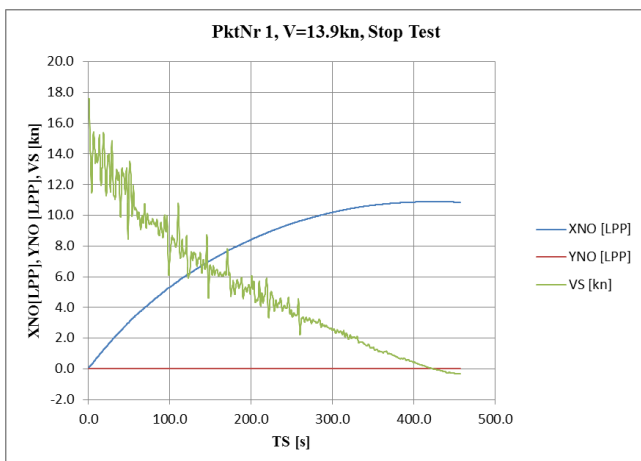
Z-Manöver mit VPS



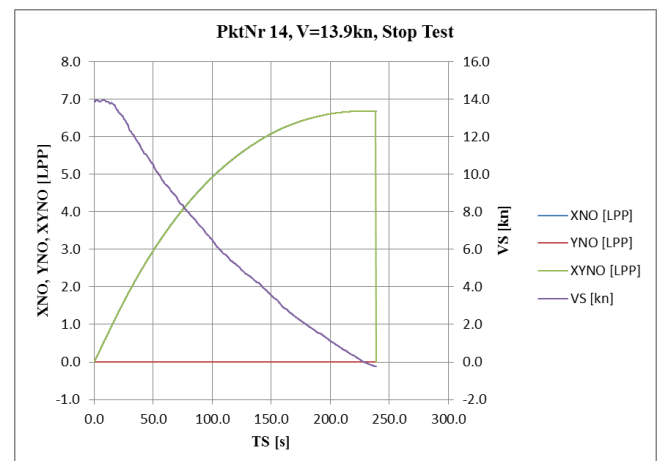
Drehkreis mit konventionellem Verstellpropeller



Drehkreis mit VPS



Stopppweg nur mit Drehzahländerung



Optimierter Stopppweg mit VPS (kombinierte Verstellung von Drehzahl und Flügelsteigung)

**Abbildung 37: Ergebnisse der einzelnen Versuchsserien**



## II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Position	Gesamtvorkalkulation (€)	Gesamtnachkalkulation (€)
0831 Material	21.825,00	21.735,00
0823 FE-Fremdleistungen	0	0
0837 Personalkosten	430.158,00	431.106,32
0838 Reisekosten	2.184,00	328,43
0847 Abschreibungen auf vorhaben- spezifische Anlagen	0	0
0848 Abschreibungen auf sonstige genutzte Anlagen des FE-Bereichs	0	0
0850 sonstige unmittelbare Vorhabens- kosten	16.916,00	16.499,30
<b>0855 Summe</b> unmittelbare Vorhaben- kosten (Pos. 0813 – 0850)	<b>471.083,00</b>	<b>469.669,05</b>
0856 Kosten innerbetrieblicher Leistungen		
0860 Verwaltungskosten		
<b>0881 gesamte Selbstkosten des Vor- habens</b> (Summe Pos. 0855 - 0860)	<b>471.083,00</b>	<b>469.669,05</b>

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

Die Entwicklung des Verstellpropellersystems war außerordentlich risikobehaftet. Vor der Bearbeitung des Projektes war es international noch nicht gelungen, die Steigung des Propellers im Versuchsbetrieb zu verstellen und die Propellerkräfte und -momente zu messen. Entwicklungen der SVA auf diesem Gebiet mit Oberflächenpropellern waren nur bedingt erfolgreich. So war die Vorgehensweise, gleich drei Konstruktionsschleifen vorzusehen, der richtige Ansatz und hat letztendlich zum Erfolg geführt.

Auch die Versuche mit dem Verstellpropellersystem am Modell unterlagen einem hohen Risiko, weil keine Erfahrungen für den Betrieb mit einem Verstellpropellersystem vorlagen und Versuchstechnologien und Auswertverfahren erarbeitet werden mussten. Probleme in der Versuchsdurchführung und im Betrieb des Systems traten wie vermutet auf und konnten durch systematische Verbesserungen gelöst werden.

Alle Mess- und Entwicklungsergebnisse der SVA wurden in ausführlichen Teilberichten dargelegt.

Da Partner in dieser Konstellation im Rahmen dieses Projektes erstmals zusammenarbeiteten, war mit einem erheblichen Zusatzaufwand für das Projektmanagement zu rechnen, der sich als real erwiesen hat. Es galt, das Netzwerk zu entwickeln und die geeigneten Kommunikationsstrukturen aufzubauen.

#### FuE-Teilberichte der SVA

- [A1] Steinwand, M.  
Bestimmung der Rumpfkkräfte eines Feederschiffes über 360° Anströmung, Modell M1405S001  
SVA Bericht 4237, Juli 2014, Potsdam
- [A2] Steinwand, M.  
Bestimmung der Kräfte auf das Schiff, den Propeller und das Ruder während eines Crashstopps, Modell M1405S001, Propeller VP1143  
SVA Bericht 4319, März 2015
- [A3] Steinwand, M.  
Manövrierversuche mit dem Modell eines Feederschiffes, Modell M1405S001, Propeller VP1143  
SVA Bericht 4320, März 2015, Potsdam

- [A4] Heinke, H.-J.  
4-Quadrantenmessungen mit dem Propeller VP1143 für 12 Steigungsverhältnisse im Kavitationstunnel K15A  
SVA Bericht 4307, April 2015, Potsdam
- [A5] Nietzschmann, Th.  
Widerstands- und Propulsionsversuche mit dem Modell eines Feederschiffes, Modell M1405S001, Propeller VP1143  
Bericht 4322, April 2015, Potsdam
- [A6] Steinwand, M.  
4-Quadrantenmessungen mit dem Propeller VP1143 für 12 Steigungsverhältnisse in der Schlepprinne  
SVA Bericht 4321, März 2015, Potsdam
- [A7] Steinwand, M.  
4-Quadrantenmessungen mit dem Propeller VP1723 für 11 Steigungsverhältnisse  
SVA Bericht 4462, Januar 2016, Potsdam
- [A8] Heinke, H.-J.  
4-Quadrantenmessungen mit dem Propeller VP1723 für 11 Steigungsverhältnisse im Kavitationstunnel K15A  
SVA Bericht 4430, November 2015, Potsdam
- [A9] Steinwand, M.  
Stoppversuche mit dem Modell eines Feederschiffes Modell M1405S001, Verstellpropellersystem, Propeller VP1697  
SVA Bericht 4480, Dezember 2015, Potsdam
- [A10] Steinwand, M.  
Manövierversuche mit dem Modell eines Feederschiffes, Modell M1405S001, Verstellpropellersystem, Propeller VP1697  
SVA Bericht 4598, September 2016, Potsdam
- [A11] Steinwand, M.  
Weitere Stoppversuche mit dem Modell eines Feederschiffes Modell M1405S001, Verstellpropellersystem, Propeller VP1697  
SVA Bericht 4599, September 2016, Potsdam
- [A12] Steinwand, M.  
Bestimmung der Kräfte auf das Schiff, den Propeller und das Ruder während eines Crashstopps, Modell M1405S001, Verstellpropellersystem, Propeller VP1697  
SVA Bericht 4600, September 2016, Potsdam

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

Die SVA nutzt die gewonnenen Ergebnisse in Form von Know-how Transfer und dem Anbieten von Versuchsleistungen bei jedem Industrieauftrag. Der direkte Nutzen für die SVA ergibt sich durch eine erweiterte Akquirierung von Industrieaufträgen mit einem Gesamtvolumen von ca. 350 T€ auf dem Gebiet der Untersuchungen von Verstellpropellersystemen.

Indirekt ergibt sich ein Nutzen für die SVA durch die Verbesserung der Reputation und den Nachweis der notwendigen Möglichkeiten zur Untersuchungen von Verstellpropellersystemen, was dann wiederum zu Industrieaufträgen führt.

Die SVA Potsdam erzielt jährlich Umsätze von ca. 1,6 Millionen EURO aus Industrieaufträgen. Ca. 20% (350 T€) dieser Aufträge beinhalten die Untersuchung des Manövrierverhaltens als auch die Untersuchung von Verstellpropellersystemen.

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.

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

1. Integration der Ergebnisse des FuE-Vorhabens in die Vorbereitung und Durchführung von Manövrierversuchen zur Untersuchung des Manövrierverhaltens von Schiffen in der SVA
2. Verwendung der Ergebnisse und Erfahrungen für Großausführungsmessungen
3. Weiterentwicklung der Auswert- und Analyseverfahren als auch der Versuchsdurchführung für Untersuchungen mit dem Verstellpropellersystem

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

Fortschritte auf dem Gebiet der labortechnischen Umsetzung von Verstellpropellersystemen zur Durchführung von instationären Laborversuchen sind in den letzten Jahren den vorliegenden Informationen nach von anderen Stellen nicht erreicht worden.

## II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

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

- [V1] Neitzel-Petersen, J. C.; Pergande, M.; Abdel-Maksoud, M.  
„Development of an Efficient Numerical Method for Coefficient-Based Simulations of Stopping Maneuvers“  
31<sup>st</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, USA, September 2016
  
- [V2] Steinwand, M.; Stutz, S.; Tigges, K.; Abdel-Maksoud, M.; Neitzel-Petersen, J. C.; Pergande, M.; Oberhokamp, F.; Sichermann, W.; Thieme, Chr.  
„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“  
BMW-Statustagung Maritime Technologien, Dezember 2016
  
- [V3] Steinwand, M.  
„Untersuchungen mit einem neuen Verstellpropellersystem“  
9. SVA-Forschungsforum „Theoria cum praxi“, Januar 2016

**Verwertungsplan mit Zeithorizont (ANBest)**

Vorhaben: OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit Verstellpropellern und Hybridantrieben

Teilvorhaben: ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern

Förderkennzeichen: 03SX356B

Laufzeit: 01.09.2013 – 31.08.2016

Anlage zum Schlussbericht, SVA Bericht Nr. 4579

<b>Lfd. Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Zeithorizont</b>
1	Integration der Ergebnisse des FuE-Vorhabens in die Vorbereitung und Durchführung von Modellversuchen in der SVA	09/2017
2	Anbieten der, durch das FuE-Projekt erarbeiteten, erweiterten Versuchsleistung	09/2017
3	Verwendung der Ergebnisse für Vergleiche mit Großausführungsmessungen	11/2017
4	Nutzung der Ergebnisse zur Anwendung auf andere Aufgabenstellungen	03/2018

# **Erfolgskontrollbericht**

zum FuE-Vorhaben

**„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“**

**Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern“**

<b>Reg.-Nr.:</b>	<b>03SX356B</b>
<b>FuE-Einrichtung:</b>	<b>Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH</b>
<b>Titel:</b>	<b>Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern SVA-Bericht 4579, Februar 2017</b>
<b>Projektlaufzeit:</b>	<b>01.09.2013 bis 31.08.2016</b>

Potsdam, den 24.02.2017

---

Name und Telefonnummer des Projektleiters: M. Steinwand, Tel.: 0331 567 12 11

---

Firmenstempel

---

Unterschrift des Projektleiters

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

**Inhaltsangabe**

	Seite
1. Beitrag des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	2
2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, Nebenergebnisse, Erfahrungen	2
3. Fortschreibung des Verwendungsplanes	4
3.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen	4
3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	5
3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	7
3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	8
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	8
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	9
6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	9



*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

## **1. Beitrag des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Der Bau von Standardschiffstypen ist inzwischen weitestgehend durch den asiatischen Markt abgedeckt. Die deutsche Schiffbauindustrie konzentriert sich daher zunehmend auf den Ausbau von Systemkompetenzen für Spezialschiffe, d.h. Schiffe, die einzeln oder in kleineren Serien gebaut werden und intensive interdisziplinäre Ingenieursleistung benötigen. Diese Systemkompetenz ist maßgeblich für das Einzelprodukt. Um am Markt zu bestehen, muss die Entwicklung neuer, innovativer Schiffstypen bzw. Antriebskonzepte zusammen mit hoher Zuverlässigkeit im Schiffsbetrieb ständig gewährleistet sein.

Die Bedeutung der dieselelektrischen und hybriden Propellerantriebe für Spezialschiffe hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Die Weiterentwicklung von Motorkomponenten und hydrodynamisch basierten Entwurfsverfahren führt neben der Entwurfsverbesserung, beispielsweise hinsichtlich des Wirkungsgrades des Gesamtsystems, auch zu einer Verkürzung der Entwicklungszeiten neuer Produkte und einer Erhöhung der Entwurfszuverlässigkeit. Dieselelektrische Propellerantriebe werden bei Spezialschiffen meistens verwendet, wenn die Anforderungen an die Manövrierbarkeit des Schiffes hoch sind. Eine Erhöhung der Genauigkeit der Simulation bedeutet folglich eine deutliche Steigerung der Sicherheit von Menschen und Geräten an Bord und eine Erhöhung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

Bei hybriden Antrieben handelt es sich um eine Kombination aus elektrischen und mechanischen Antrieben. Diese können für verschiedene Einsatzbereiche erhebliche Vorteile bieten. Durch sogenannte PTOs / PTIs kann dem Antriebsstrang Energie entnommen bzw. zugegeben werden, um, je nach momentaner Einsatzsituation, eine optimale Energiebilanz zu bieten. In Bezug auf die Schiffssicherheit wird dadurch eine zusätzliche Redundanz gegeben.

Die Ergebnisse des Vorhabens tragen zur Erhöhung der Sicherheit von Schiffen in kritischen Situationen, wie bei einem Stoppmanöver, bei und leisten einen Anteil zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Schiffbauindustrie. Das Forschungsvorhaben fügt sich somit in das Forschungsprogramm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ ein.

## **2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, Nebenergebnisse, Erfahrungen**

Die Untersuchungen im Verbundvorhaben OPTISTOPP reichten von der Entwicklung hydrodynamischer und elektrotechnischer Simulationen hin zur modelltechnischen Umsetzung und der Entwicklung von neuer Modelltechnik.

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

Im Verbundvorhaben OPTISTOPP konnten durch die gezielte Aufgabenteilung in Summe ein System zur vollständigen Simulation (Bewegung, Kräfte, elektrische Komponenten) von dynamischen Stoppmanövern von Schiffen mit Fest- bzw. Verstellpropellern entwickelt werden.

Das Verbundvorhaben gliederte sich in die Entwicklung von numerischen und experimentellen Verfahren. Dabei teilten sich die Antragsteller die Gesamtaufgabe gemäß folgender Schwerpunktsetzung:

- Simulationsverfahren für Hybridantriebe unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Wechselwirkungen (BVN, TKMS)
- Integration elektrischer Auslegeverfahren (SIEMENS)
- Entwicklung eines numerischen Modells zur Simulation von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern und elektrischen oder hybriden Antrieben (TUHH)
- Experimentelle Untersuchungen von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern (SVA)

Folgende wesentliche Ergebnisse wurden im Verbundvorhaben erreicht:

**Simulationsverfahren für Hybridantriebe unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Wechselwirkungen (BVN, TKMS)**

Es wurde ein Rechenverfahren zur Durchführung zuverlässiger Simulationen von Stoppmanövern von mit leistungsverzweigten hybriden Antriebssystemen versehenen Schiffen entwickelt. Das Verfahren macht die technischen Möglichkeiten der Propellerantriebe nutzbar und für Verstellpropeller anwendbar.

Um dieses Ziel zu erreichen, musste das zu entwickelte Simulationsverfahren für die Berechnung des Stoppmanövers das dynamische Verhalten von den an diesem Manöver beteiligten Betriebsführungs-, Steuerungs- und Regelungssystemen an Bord einbeziehen.

**Integration elektrischer Auslegeverfahren (SIEMENS)**

Es wurde ein Berechnungs- und Simulations-Tool entwickelt, um zuverlässiger Aussagen zum dynamischen Verhalten von Bordnetzen zu erhalten.

Insbesondere waren Stoppmanöver von dieselektrischen, dieselmechanischen und hybriden Propellerantrieben von großem Interesse, da darüber bisher nur unzureichende Aussagen getätigt werden konnten. Neben der Stabilitätsbetrachtung des Bordnetzes konnten auch Vorteile der unterschiedlichen Systeme simuliert und dargestellt werden. Diese Simulationen können somit zukünftig eine wichtige Entscheidungsgrundlage bei der Systemwahl bilden. Zur Entwicklung des Simulationsverfahrens war es notwendig, die unterschiedlichen Fahrmotoren mathematisch nachzubilden und in die bereits existierenden Echtzeitmodelle

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

einzu pflegen. Noch nicht existierende Modelle wurden neu erstellt und verifiziert. Das Verfahren wurde von SIMIT in MATLAB/Simulink überführt.

**Entwicklung eines numerischen Modells zur Simulation von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern und elektrischen oder hybriden Antrieben (TUHH)**

Ein Rechenverfahren zur Durchführung zuverlässiger Simulationen von Stoppmanövern von Schiffen, die mit dieselektrischen oder hybriden Propellerantrieben ausgerüstet sind, wurde entwickelt. Das Verfahren nutzt die technischen Möglichkeiten der Propellerantriebe und ist für Fest- und Verstellpropeller anwendbar.

Zur Entwicklung des Simulationsverfahrens war es notwendig, eine Datenbasis für die wichtigsten Wechselwirkungsparameter zwischen Propeller und Schiff, wie Sog- und Nachstromziffer unter Stoppmanöverbedingungen, zu generieren. Da die Maßstabeffekte nicht unerheblich sein können, erfolgte die Generierung dieser Daten mit Hilfe eines Rechenverfahrens für viskose Strömung. Die Rechenergebnisse wurden hauptsächlich für die Großausführung durchgeführt. Zu Validierungszwecken jedoch erfolgten einige Berechnungen im Modellmaßstab.

**Experimentelle Untersuchungen von Stoppmanövern von Schiffen mit Verstellpropellern (SVA)**

Die SVA hat ein Verstellpropellersystem im Modellmaßstab entwickelt, das die Steigungen der Propellerflügel während des Versuchs dynamisch ändern kann. Dementsprechend sollte die dazugehörige messtechnische Umgebung zur Durchführung von Modellversuchen realistischer Stoppmanöver von Schiffen mit Verstellpropellern realisiert werden. Das System sollte eine Datenbasis in systematischen Versuchen mit dem freifahrenden Verstellpropeller und dem manövrierenden Schiff erarbeitet und den Projektpartnern zur Verfügung stellen.

**3. Fortschreibung des Verwendungsplanes**

**3.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen**

keine

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

### **3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Im Folgenden werden nur die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des Teilvorhabens der SVA im Verbundvorhaben betrachtet.

#### **Funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen**

Erst mit den Ergebnissen des Projektes ist es möglich, realistische Stoppversuche von Schiffen mit Verstellpropellersystem im Modellmaßstab durchzuführen. Die hydrodynamischen Eigenschaften des Verstellpropellers unterscheiden sich erheblich, wenn anstatt der Steigung die Drehzahl reduziert wird. Der Stoppweg und die Kräfte am Verstellpropeller können mit dem neuen Verstellpropellersystem somit sehr viel genauer untersucht werden. Die Anwendung der Technik bei anderen Manövern ist gewünscht und wird nach der regulären Einführung in die Versuchstechnik auch angewendet werden.

Perspektivisch ist auch eine Anwendung des entwickelten Verstellpropellersystems bei Propulsionsversuchen denkbar, bei denen bei Off-Design-Bedingungen Kombinationen von Drehzahl und Flügelsteigung untersucht werden können, um auch bei kleineren Geschwindigkeiten des Schiffes den realistischen Treibstoffverbrauch des Schiffes bestimmen zu können.

Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens hat die SVA Potsdam auf einem speziellen, aber wichtigen Teilgebiet der Untersuchungen der Schiffshydrodynamik ein Alleinstellungsmerkmal erreicht, dass die SVA in Zukunft offensiv bewerben wird um damit neue Aufträge und Kunden zu akquirieren.

#### **Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien**

Der Nutzen ergibt sich für den Propellerhersteller (garantiert für sein Produkt), dem Ausrüster der Bordelektronik (Elektronik kann vereinfacht und kostengünstiger gestaltet werden), die Werft (garantiert für das Schiff), den Reeder (nutzt das Schiff mit seinen Gebrauchseigenschaften und Kosten) sowie die Versuchsanstalten (garantiert für die Versuchsergebnisse) und die Projektpartner (wissenschaftlich-technische Spitzenleistungen).

#### **Propellerhersteller**

Der Antriebshersteller kann mit den Ergebnissen des Modellversuchs der Werft/dem Reeder die genauen Kräfte des Verstellpropellersystems und eine geeignete, optimierte Strategie des Stoppvorgangs vorlegen, um Rückspeisungen in die Bordelektronik zu vermeiden.

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

## **Werft**

Die Werft kann mit dem eingebauten System Vorteile gegenüber Konkurrenten geltend machen, indem sie Bordelektronik einbaut, die genau den Anforderungen (auch beim Stoppen) des Schiffes entspricht und somit kostengünstiger ist als Standardlösungen. Damit erreicht auch die Werft einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Werften.

Die Werft garantiert zudem für die Gebrauchseigenschaften des Schiffes und für die Einhaltung der Betriebsparameter. Werden bei den Probefahrten die prognostizierten Eigenschaften des Schiffes nicht erreicht, fordert der Reeder grundsätzlich eine Nachbesserung, die zusätzliche Kosten verursacht.

## **Reeder, Eigner**

Der Reeder benötigt ein betriebssicheres Schiff. Durch die Ergebnisse des Verbundprojektes können Stoppabläufe für Schiffe mit Verstellpropellern berechnet werden, um den Stoppweg zu minimieren.

## **Versuchsanstalt**

Verbesserte Methoden zur experimentellen Untersuchung von Verstellpropellersystemen sind für die Arbeit der Versuchsanstalt von großer Bedeutung. Die Versuchsanstalt kann durch die gewonnenen Erkenntnisse ihr Angebot an Versuchsleistungen erweitern. Darüber hinaus ergibt sich ein Gewinn an Reputation und Kompetenz, der zur Akquise von Aufträgen aus der Industrie führen kann.

## **Umsetzungs- und Transferstrategien**

Die Ergebnisse des FuE-Vorhabens wurden in Teilberichten, im Schlussbericht und in Veröffentlichungen dargelegt.

Die Vermarktung der nach Durchführung des Forschungsvorhabens neuen Leistungen und Erkenntnisse der SVA erfolgt über die ständigen Kontakte der SVA zu Werften, Reedern, Ingenieurbüros, Institute, öffentliche Einrichtungen usw. Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse der FuE-Vorhaben in SVA-Foren, Berichten, Vorträgen, Veröffentlichungen, Messen werden die potenziellen Kunden über den neuesten Stand der Technik und die Leistungsfähigkeit der Experimentaltechnik und des „Numerischen Tanks“ der SVA auf dem Gebiet der Entwicklung und Optimierung von Schiffen und Antriebssystemen informiert.

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*  
Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

Außerdem werden die Resultate der Forschung und die Leistungen der SVA über die Angebote zu Anfragen der Industrie, Behörden usw. und bei der Akquirierung neuer Industrieaufträge gezielt angeboten.

Die Erarbeitung von Know-how auf dem Gebiet der Durchführung, Auswertung und Analyse von Versuchen mit Verstellpropellersystemen ist auf Grund der steigenden Anforderungen von großer Bedeutung für die erfolgreiche Akquirierung von Aufträgen aus der Industrie.

### **3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten**

Die SVA verfügt über fünf Jahrzehnte Erfahrungen auf dem Gebiet der Untersuchung von Verstellpropellern und der Durchführung von Manövrierversuchen.

Es wurde auf Basis von bewährter Messtechnik der Modellverstellpropeller weiterentwickelt und mit den Anforderungen von Verstellodynamik, Verstellkräften und Antriebssystem verbunden. Mit der Entwicklung eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Untersuchung und Analyse des Stoppverhaltens von Schiffen als auch von Verstellpropellersystemen.

Die SVA nutzt die gewonnenen Ergebnisse in Form von Know-how Transfer und dem Anbieten von Versuchsleistungen bei jedem Industrieauftrag. Der direkte Nutzen für die SVA ergibt sich durch eine erweiterte Akquirierung von Industrieaufträgen mit einem Gesamtvolumen von ca. 350 T€ auf dem Gebiet der Untersuchungen von Schiffen mit Verstellpropellersystemen oder von Verstellpropellern alleine.

Indirekt ergibt sich ein Nutzen für die SVA durch die Verbesserung der Reputation und den Nachweis der notwendigen Möglichkeiten zur Untersuchungen von Verstellpropellersystemen, was dann wiederum zu Industrieaufträgen führt.

Die SVA erzielt jährlich Umsätze von ca. 1,6 Millionen EURO aus Industrieaufträgen. Ca. 20% (350 T€) dieser Aufträge beinhalten die Untersuchung des Manövrierverhaltens als auch die Untersuchung von Verstellpropellersystemen.

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.

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

### **3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Nachfrage nach Modellversuchen zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Schiffen ist in den letzten 5 Jahren stark gestiegen. Mit der Entwicklung des dynamisch verstellbaren Verstellpropellersystems wird die SVA den damit einhergehenden Ansprüchen nach Verwendung unterschiedlichster Steuer- und Propulsionsorganen im Modellversuchswesen gerecht.

Der Fortschritt liegt für die SVA in der Erweiterung der Modellversuchstechnik. Zum einen ist dabei die Entwicklung des elektro-mechanischen Verstellpropellersystems zu nennen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Modellverstellpropellern, die zeitaufwändig per Hand verstellt werden müssen, der Versuch muss dafür in der Schlepprinne als auch im Kavitationstunnel unterbrochen werden, kann die Steigung mit dem neuen System automatisch und dynamisch verstellt werden. Dies ermöglicht die Erweiterung der Versuchsleistungen und die Steigerung der Produktivität bei Versuchen.

Zum anderen wird eine, den Anforderungen entsprechende, Regelung des Modellversuchs unter Berücksichtigung der Dynamik einer modernen dieselektrischen Antriebssystems entwickelt. Auch hier ist eine Erweiterung der Versuchsleistung gegeben, die sich auch auf andere Propulsions- und Steuersystemen übertragen lässt.

Die SVA selbst vertreibt die gewonnenen Ergebnisse in Form von Know-how-Transfer bei jedem Industriauftrag. Der direkte Nutzen ergibt sich durch die Gewährleistung von Industriaufträgen durch Versuchs- und Entwicklungsleistungen im Rahmen der Optimierung des Gesamtsystems Schiff und des Propulsionssystems.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens passen in das Gesamtkonzept der SVA, bei dem Entwicklungen auf dem Gebiet der Antriebssysteme und des Bewegungsverhaltens von Schiffen ein Hauptbestandteil sind. Durch das erweiterte Know-how wird die Wettbewerbsfähigkeit der SVA auf diesem Gebiet weiter gefestigt.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern auf Fachkonferenzen und durch Beiträge in den einschlägigen Zeitschriften ("Hansa", "Schiff und Hafen", "Naval Architect" usw.) vermarktet.

## **4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

keine

*„OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen  
mit Verstellpropellern und Hybridantrieben“*

Teilvorhaben „ExStopp – Experimentelle Untersuchung von Stoppmanövern  
von Schiffen mit Verstellpropellern“

## **5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

Die Ergebnisse der SVA sind für jeden Nutzer über ausführliche Teilberichte zu den einzelnen Arbeitsschwerpunkten und Untersuchungsobjekten und den Schlussbericht zum FuE-Vorhaben verfügbar.

## **6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung**

Die Kosten- und Zeitplanung des FuE-Vorhabens wurde eingehalten.