

Hydrodynamische Optimierung von Podded Drives und aktuelle Anwendungen in der Großausführung (Anwendungsbeispiele SSP)

Kaul, S.; Heinke, H.-J.; Abdel-Maksoud, M.

1. Einleitung

Die Anwendung von Podded Drives als Hauptantriebsanlage von Schiffen wird auf Grund der guten hydrodynamischen Eigenschaften des Antriebssystems und den Vorteilen des diesel-elektrischen Antriebes zunehmend nachgefragt. Hauptmerkmal des Podded Drives ist die Integration eines leistungsstarken Elektroantriebes in einer hydrodynamisch optimierten Gondel unter dem Schiff, der direkt den Propeller antreibt. Derzeit auf dem Markt sind folgende Podded Drives: AZIPOD® (ABB), MERMAID™ (KaMeWa/Cegelec), SSP (Schottel/Siemens), DOLPHIN (Lips/STN).

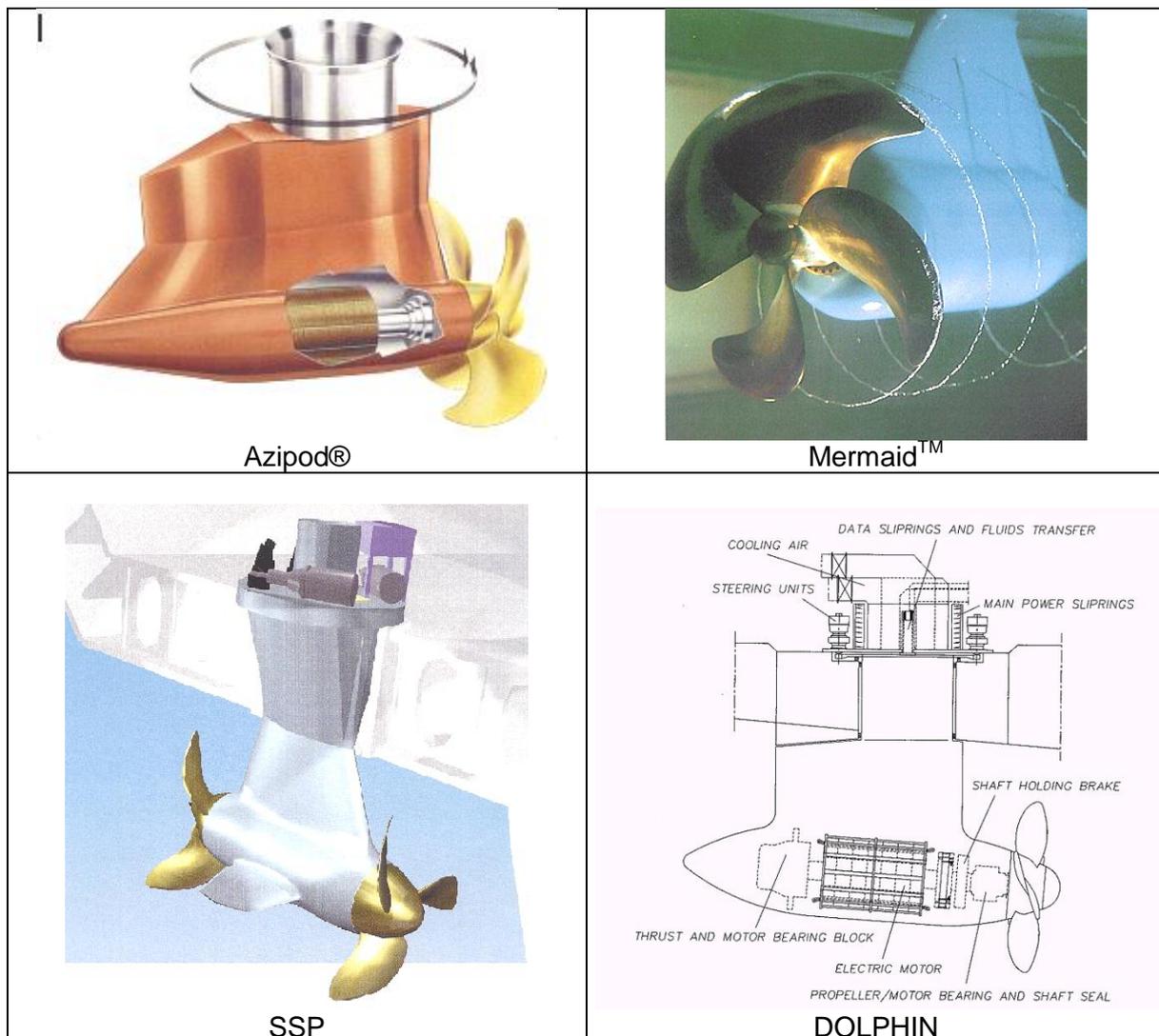


Bild 1: Podded Drives

Kaul, S.
Heinke, H.-J.
Abdel-Maksoud, M.

SCHOTTEL GmbH & Co. KG
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

Gegenüber einer konventionellen Propelleranordnung muß beim Podded Drive die Wechselwirkung zwischen dem Propeller und dem Podgehäuse beachtet werden. Die Kennwerte des Propellers verändern sich auf Grund der Wechselwirkungseffekte und das Podgehäuse liegt bei der überwiegend angewendeten Zugpropelleranordnung im Propellerstrahl.

Die Entwicklung und Optimierung von Podded Drives erfordert Kenntnisse über das Zusammenwirken von Propeller und Podgehäuse sowie über den Einfluß von Entwurfsparametern auf die Kennwerte des Systems. Durch Modellversuche, CFD-Berechnungen und die Analyse von Großausführungsmessungen werden derzeit die Kenntnisse für das neue Antriebssystem ständig erweitert.

2. Propulsion und Propellerentwurf

Durch den Einsatz von Podded Drives ergeben sich in Verbindung mit dem diesel-elektrischen Antriebskonzept Freiräume für den Schiffsentwurf. Bei Zweischaubern kann durch den Hinterschiffsentwurf und die optimale Anordnung des Podded Drives (Anstellung des Podded Drives in der horizontalen und vertikalen Richtung) eine relativ homogene Zuströmung zum Podded Drive erreicht werden (Bild 2). Der Wirkungsgrad eines optimierten Podded Drives ist nur geringfügig kleiner als der Wirkungsgrad des Propellers ohne Pod. Durch den Wegfall der Anhänge (Wellenleitungen, Wellenböcke, Wellenhosen) und die Freiräume zur Optimierung des Hinterschiffs kann der Widerstand des Schiffes vermindert und die Propulsion verbessert werden. Beim Propellerentwurf muß die Anordnung des Propellers am Pod beachtet werden. Die Kennwerte des Zugpropellers werden durch die Wechselwirkung mit dem Podgehäuse deutlich beeinflusst und in der Propellerebene ist eine Stauwirkung des Podgehäuses zu verzeichnen (Bild 3). Der Druckpropeller arbeitet hinter dem Podgehäuse und kann ähnlich wie ein Propeller in einem konventionellen Propulsionssystem entworfen werden. Dabei müssen jedoch die Wechselwirkungseffekte mit dem Podgehäuse und die Nachstromdelle hinter dem Schaft beachtet werden (Bild 4).

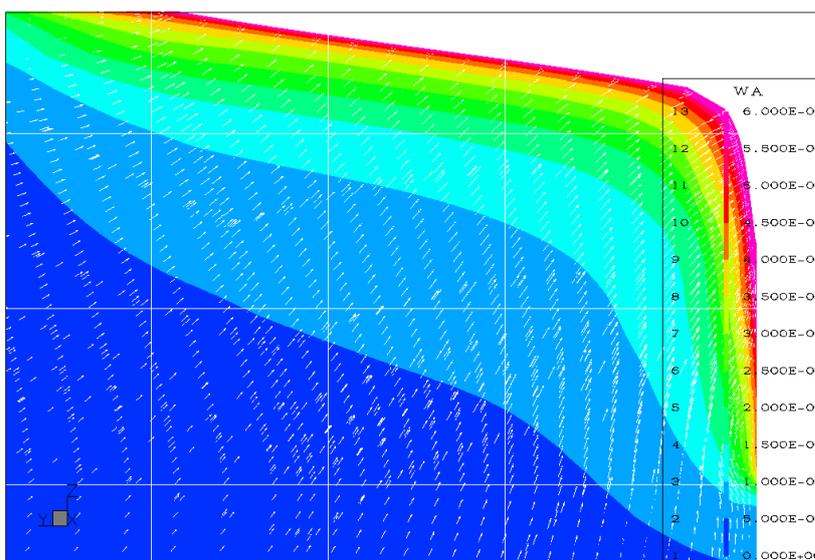


Bild 2: Typisches Nachstromfeld eines Zweischaubers

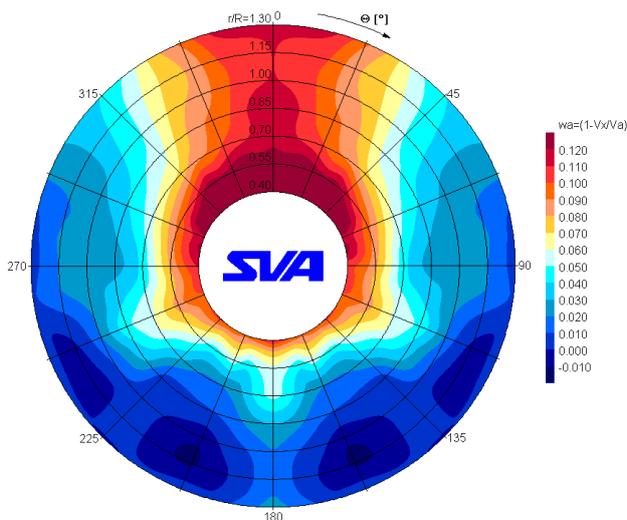


Bild 3: Axiale Geschwindigkeitskomponenten ($w_a = 1 - V_x/V_A$) vor einem Podgehäuse

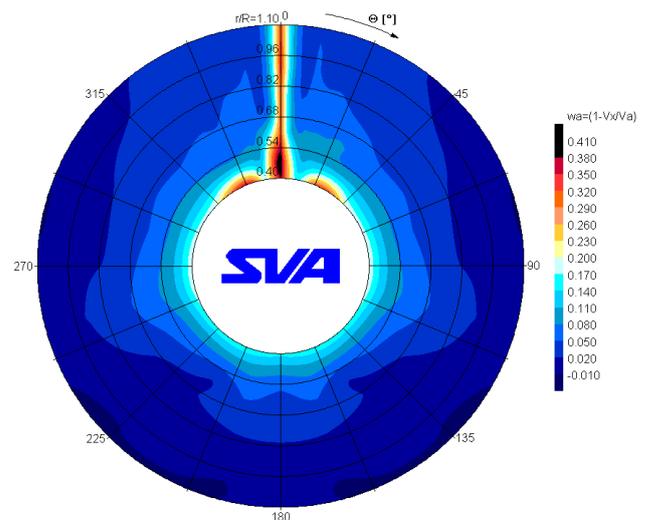
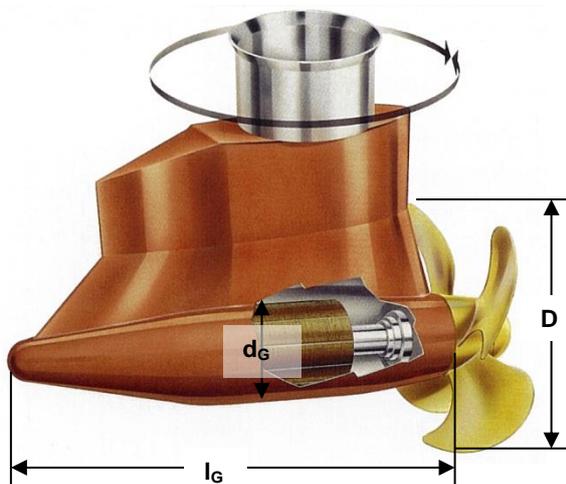


Bild 4: Axiale Geschwindigkeitskomponenten ($w_a = 1 - V_x/V_A$) hinter einem Podgehäuse

3. Geometrische Parameter des Podgehäuses

Die Abmessungen des Podgehäuses werden durch die notwendigen Einbauten (E-Motor, Lager, Dichtungen, ...) und die Festigkeitsanforderungen bestimmt. Im Bild 5 sind die aus hydrodynamischer Sicht wesentlichen Hauptparameter eines Podgehäuses dargestellt.



Länge des Pods	l_G	[m]
Längenverhältnis des Pods	l_G/D	[-]
Durchmesser des Pods	d_G	[m]
Durchmesserverhältnis des Pods	d_G/D	[-]
Abstand zwischen Propellerebene und Drehachse	b	[m]
Abstandsverhältnis	b/D	[-]
Länge des Schaftes	C	[m]
Benetzte Oberfläche	S	[m ²]

Bild 5: Parameter des Podgehäuses am Beispiel eines Azipods (Darstellung des Azipods nach J. Andersson, S. Eloranta (1998) [1])

Das Ergebnis einer Optimierung des Podgehäuses sollte die Minimierung der Wechselwirkung zwischen Propeller und Gehäuse sein. Eine minimale Wechselwirkung zwischen Propeller und Podgehäuse ist für die Effektivität und Kavitationsgefährdung des Systems von entscheidender Bedeutung.

3. Propellerparameter

Die Zielstellungen beim Entwurf von Podded Drives beinhalten u.a. einen hohen Wirkungsgrad, eine minimale Kavitationsgefährdung und eine geringe Schwingungserregung. Die Entwurfsanforderungen müssen für das Gesamtsystem (Propeller, Podgehäuse) erfüllt werden. Der Propellerentwurf für Podded Drives ist gegenüber dem konventionellen Propellerentwurf komplexer, weil zusätzlich die Wechselwirkung des Propellers mit dem Podgehäuse beachtet werden muß und das Nabendurchmesser Verhältnis ungünstig ist. Wesentliche Propellerparameter werden im folgenden kurz diskutiert.

- Anzahl der Flügel

Oft wird eine höhere Anzahl von Flügeln angewandt, um die propellerinduzierten Schwingungen am Schiffskörper zu reduzieren. Die Erhöhung der Propellerflügel eines Zugpropellers führt zu einer homogenen Strömung hinter dem Propeller und die Schwingungserregung des Podgehäuses durch den Propeller wird ebenfalls verringert.

- Geometrie der Flügel

Die radiale Belastungsverteilung, der Skewwinkel und der Rake sind die interessierenden Größen für den Propeller.

Eine Reduktion der Kavitation an den Flügelspitzen und der Nabe kann durch die Verringerung der Belastungen an der Flügelspitze und der Nabe erreicht werden. Über den Skewwinkel wird die Flügelbelastung nacheinander über eine lange Periode während der Propellerdrehung verteilt. Die Kavitation pulsiert nicht so stark und eine Reduktion der Schwingungserregung kann erreicht werden. Die Verwendung eines Skews schließt einen weiteren benötigten axialen Raum für den Propeller ein. Bei Anwendung eines angemessenen Rakes kann dieser benötigte axiale Raum begrenzt werden. Der Rake ist für Propeller mit hohem Skew von entscheidender Bedeutung. Der Rake kann genutzt werden, um den Freiraum zum Podgehäuse zu vergrößern.

Beim SSP-System (Bild 6) müssen weiterhin die Parameter Abstand der Propellerebenen der Twinpropeller und die Phasenlage der Twinpropeller zueinander beachtet werden.

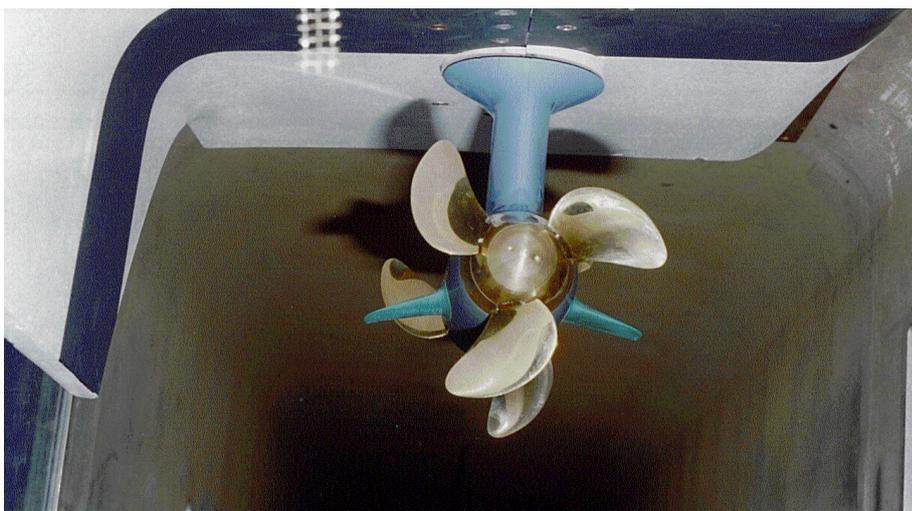


Bild 6: SSP-System im Modellversuch

4. Kennwerte von Podded Drives

Die Arbeit des Propellers am Pod bewirkt eine Wechselwirkung zwischen dem Propeller und dem Gehäuse des Podded Drives. Die Kennwerte des Propellers am Podgehäuse verändern sich im Vergleich mit den Kennwerten des Propellers unter Freifahrtbedingungen (Bild 7).

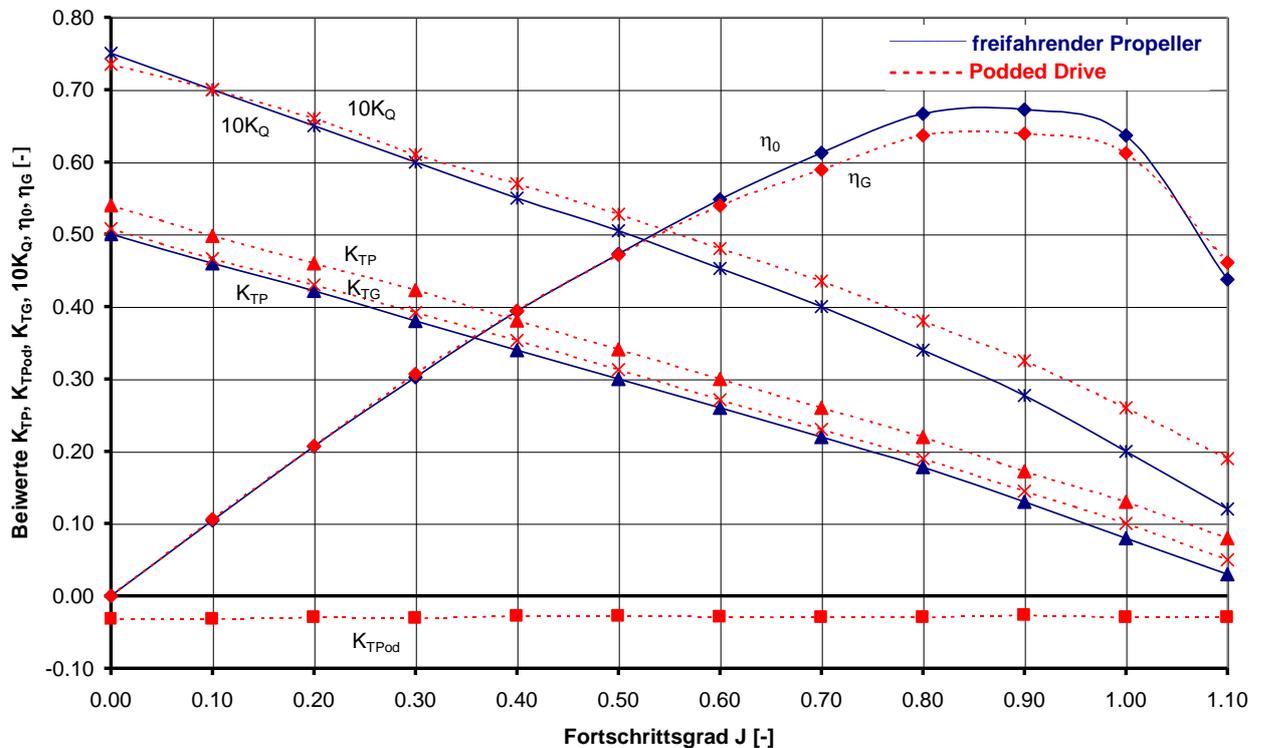
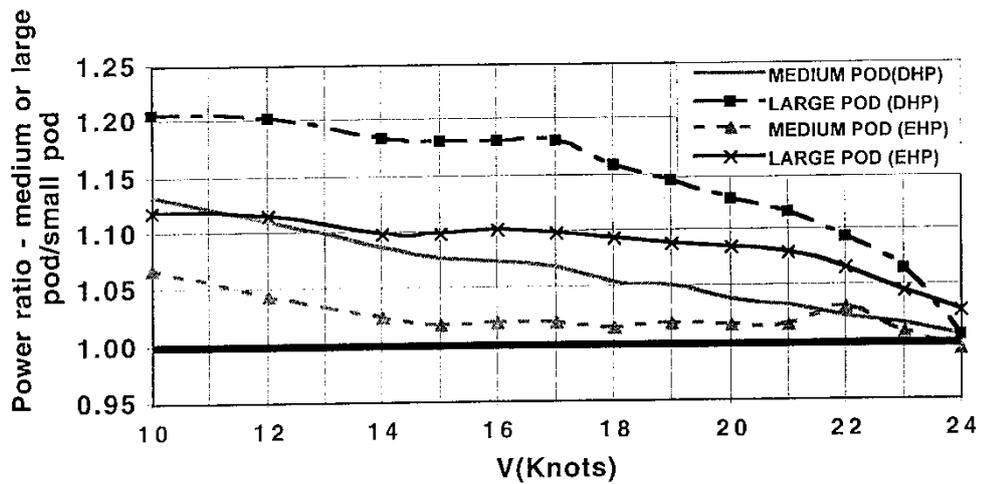
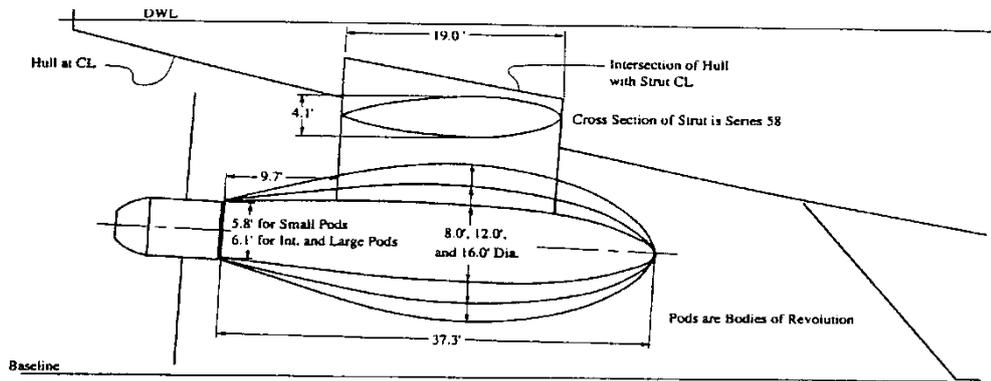


Bild 7: Kennwerte eines Zugpropellers mit und ohne Azipodgehäuse nach F. Mewis (1998) [2]

Der Propellerschub- und der Drehmomentenbeiwert nehmen zu, wenn der Propeller vor oder hinter dem Podgehäuse arbeitet. Das Podgehäuse selbst erzeugt einen Widerstand und der Gesamtschub des Podded Drives wird im Bereich des Schubes des freifahrenden Propellers liegen.

Die Wechselwirkungseffekte basieren im wesentlichen auf der durch die Gondel und den Schaft induzierten Druckverteilung in der Propellerebene und die Umströmung der Gondel und des Schafes [3].

Untersuchungsergebnisse zum Einfluß von Podparametern auf die Kennwerte des Systems und die Propulsion des Schiffes wurden bisher kaum veröffentlicht. Bild 8 zeigt im Überblick den Versuchsaufbau und die Ergebnisse von Propulsionsversuchen mit einem Schiff mit drei unterschiedlichen Podvarianten. Es wird deutlich, daß die Vergrößerung des Gondeldurchmessers zu einer deutlichen Zunahme der notwendigen Antriebsleistung führt.



Untersuchte Podvarianten

- schmäler Pod $d_G/D = 0,286$
- mittlerer Pod $d_G/D = 0,429$
- großer Pod $d_G/D = 0,572$

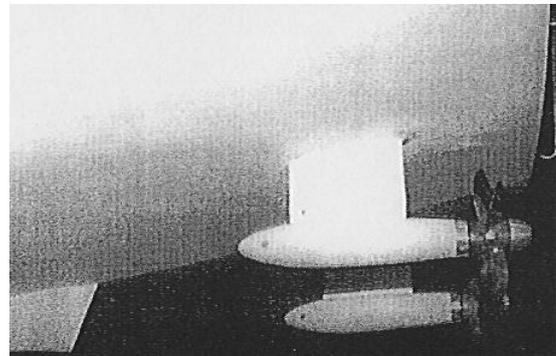


Bild 8: Ergebnisse von Propulsionsversuchen mit unterschiedlichen Podvarianten vor einem Druckpropeller nach S. Fung; G. Karafiath; D. McCallum (1998) [4]

Zur detaillierten Erfassung der Wechselwirkungseffekte zwischen Propeller und Podgehäuse wurden in der SVA systematische Freifahrtversuche mit Zugpropeller-Gondelanordnungen durchgeführt. Im Bild 9 sind die Freifahrtkennlinien eines Zugpropellers ohne Gondel und mit zwei Gondeln mit Durchmesserhältnissen $d_G/D = 0,40$ und $0,70$ dargestellt. Bild 10 zeigt das Verhältnis des Gesamtschubes zum Propellerschub für einen Zugpropeller mit unterschiedlichen Gondeln.

Der Widerstand des Podgehäuses und das Verhältnis vom Gesamtschub zum Propellerschub wird im wesentlichen durch den Gondeldurchmesser bestimmt. Mit der Zunahme des Gondeldurchmessers verschlechtert sich das Verhältnis von Gesamtschub zum Propellerschub.

Die Versuchsergebnisse verdeutlichen auch eine Abhängigkeit des Verhältnisses vom Gesamtschub zum Propellerschub vom Schubbelastungsgrad des Propellers. Diese Abhängigkeit ist insbesondere bei Antriebssystemen für schnelle Schiffe von Bedeutung, weil der Schubbelastungsgrad hier niedrig ist und somit ungünstige Verhältnisse des Gesamtschubes zum Propellerschub auftreten.

Das Bild 11 zeigt Versuchsergebnisse für eine Variation der Gondellänge bei konstantem Durchmesser. Es wird deutlich, daß die Gondellänge die Kennwerte des Propellers und des Gesamtsystems Propeller mit Gondel nur unwesentlich beeinflusst.

Die Untersuchungen zeigen insgesamt, daß der Gondeldurchmesser minimiert werden muß, um den Widerstand des Podgehäuses und die Wechselwirkung mit dem Propeller gering zu halten.

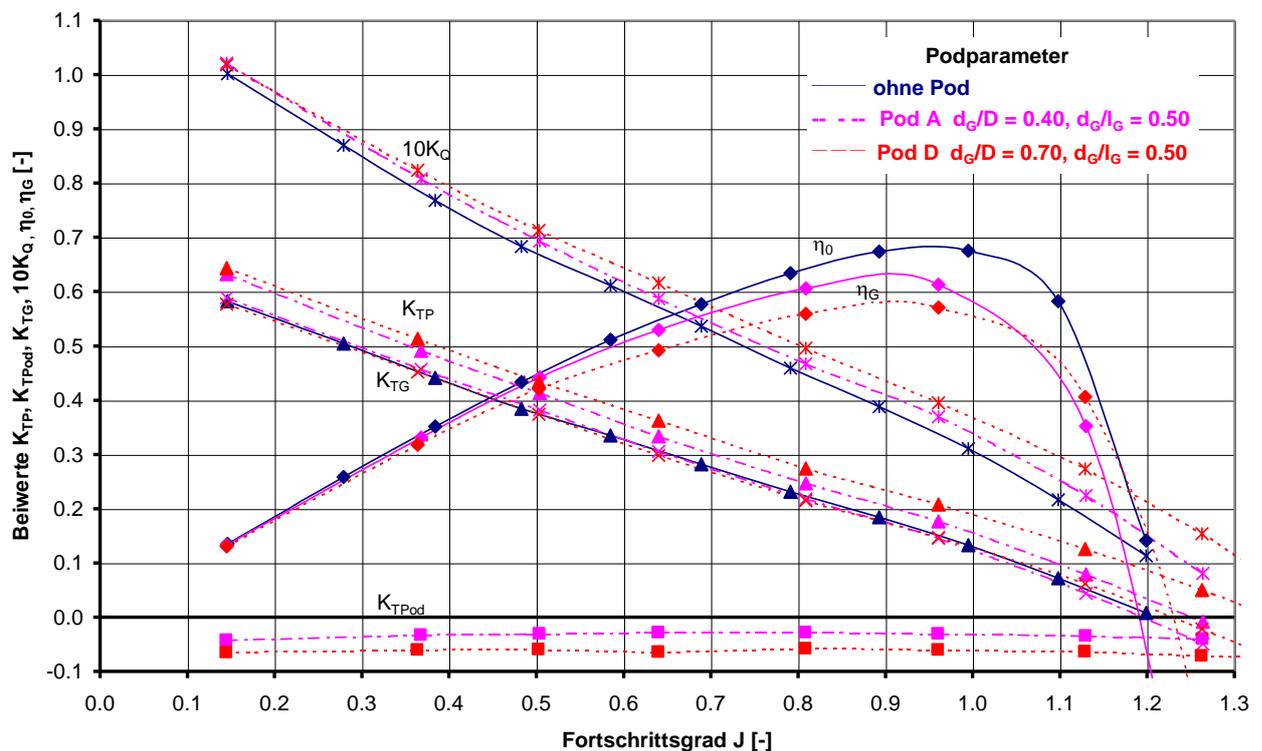


Bild 9: Kennwerte von Podded Drives – Einfluß des Pods auf die Propellerkennwerte

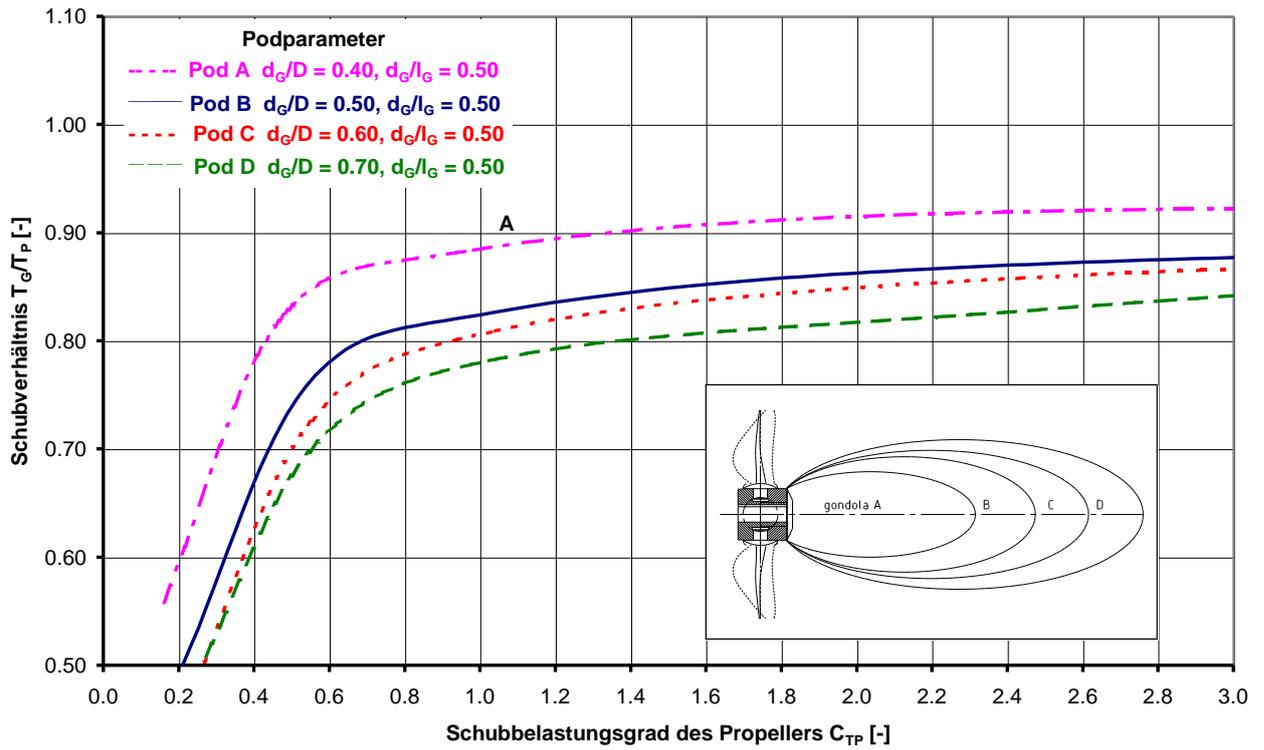


Bild 10: Kennwerte des Podded Drives – Einfluß der Gondelparameter

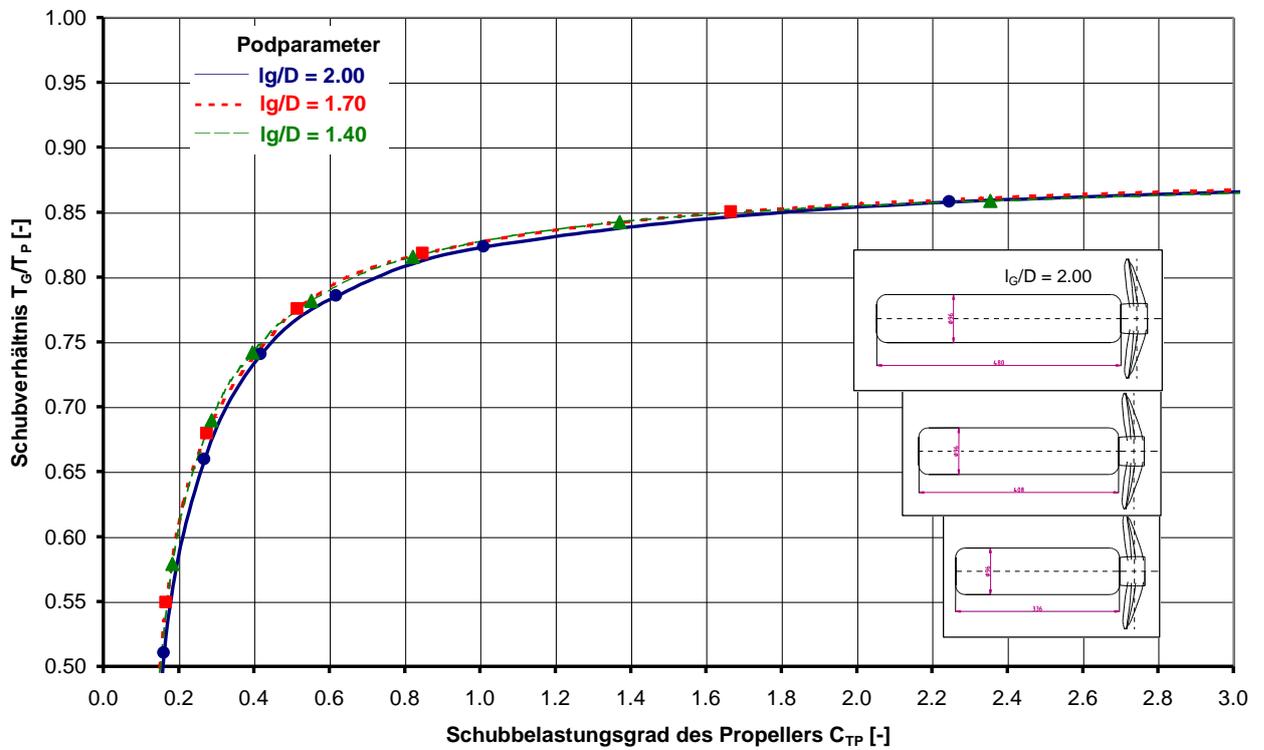


Bild 11: Kennwerte des Podded Drives – Einfluß der Gondellänge

Bei einer Zugpropelleranordnung muß der Übergang von der Propellernabe zur Gondel beachtet werden. Der Einfluß des Überganges Propeller-Gehäuse wurde in der SVA u.a. mit einem Wageningen Propeller an zwei unterschiedlichen idealisierten Podgehäusen untersucht (Bild 12). Der stumpfe Übergang bewirkt eine stärkere Wechselwirkung zwischen dem Zugpropeller und dem Podgehäuse. Bei niedrigen Schubbelastungsgraden ist auf Grund dieser Wechselwirkungseffekte mit einem höheren Gesamtwirkungsgrad des Systems zu rechnen.

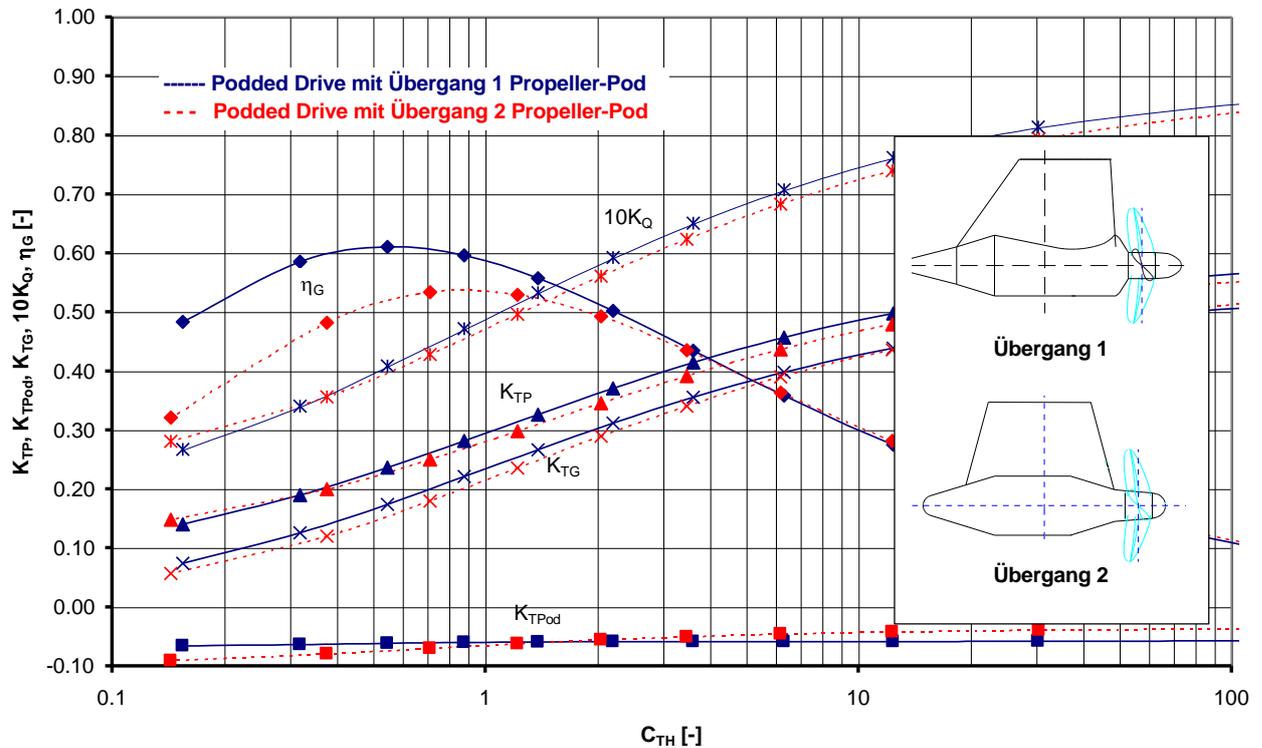


Bild 12: Einfluß des Überganges vom Propeller zur Gondel auf die Kennwerte von Podded Drives

5. Untersuchungen zur Optimierung von Podded Drives am Beispiel des SSP-Systems

Zur Bestimmung der Betriebsparameter von Podded Drives und zur Optimierung des Systems werden potentialtheoretische Berechnungen, Modellversuche und Berechnungen zur Ermittlung der viskosen Umströmung durchgeführt. Eine besondere Herausforderung ist der Entwurf und die Optimierung des SSP-Systems, weil hier ein Twinpropellersystem auszulegen ist.

5.1 Entwurf und Modellversuche

Der Entwurf der Propeller erfolgt auf der Basis von Lifting Surface Verfahren. Die Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Gehäuse erfolgt mit Hilfe eines Systems von Parametern, die aus der Analyse einer Vielzahl von Messungen gewonnen wurden. Zur Auslegung des hinteren Propellers wird die Zuströmung unter Beachtung des Nachstromfeldes des Schiffes, des Propellerstrahls des vorderen Propellers und der Umströmung des Podgehäuses berechnet.

Die prognostizierten Eigenschaften des SSP-Systems werden in Modellversuchen überprüft. In Freifahrtversuchen werden die Schub- und Drehmomentenbeiwerte der Twinpropeller und der Ge-

häusewiderstand bestimmt. Die Kennlinien geben Aufschluß über die realisierte Leistungsaufteilung zwischen den Propellern und gestatten auch die Überprüfung der Phasenlage der Propeller zueinander. Die Analyse des Gehäusewiderstandes in Verbindung mit dem Gesamtschub des Systems gibt Hinweise zur Güte der Podgeometrie.

Durch Freifahrtversuche mit unterschiedlichen Schwenkwinkeln können die Kennwerte des Systems (Propellerkennwerte, Querkraft, Steuermoment) beim Schwenken ermittelt werden. Detaillierte Informationen zum SSP-System werden durch Kavitationsversuche (Bild 13) und Geschwindigkeitsmessungen gewonnen. Insbesondere die Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung in der Druckpropellerebene (Bild 14) ist für den Entwurf des hinteren Propellers von Bedeutung.

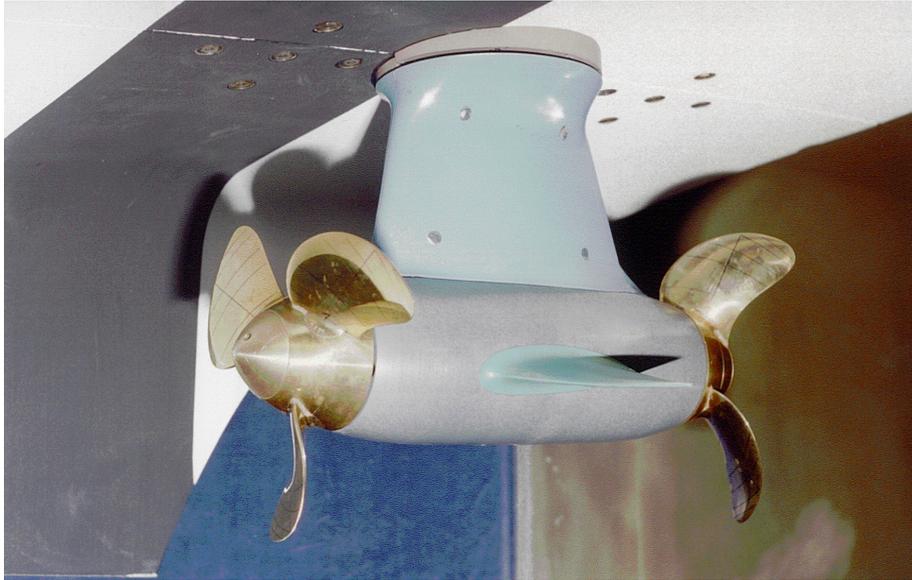


Bild 13: SSP-System im Kavitationstunnel

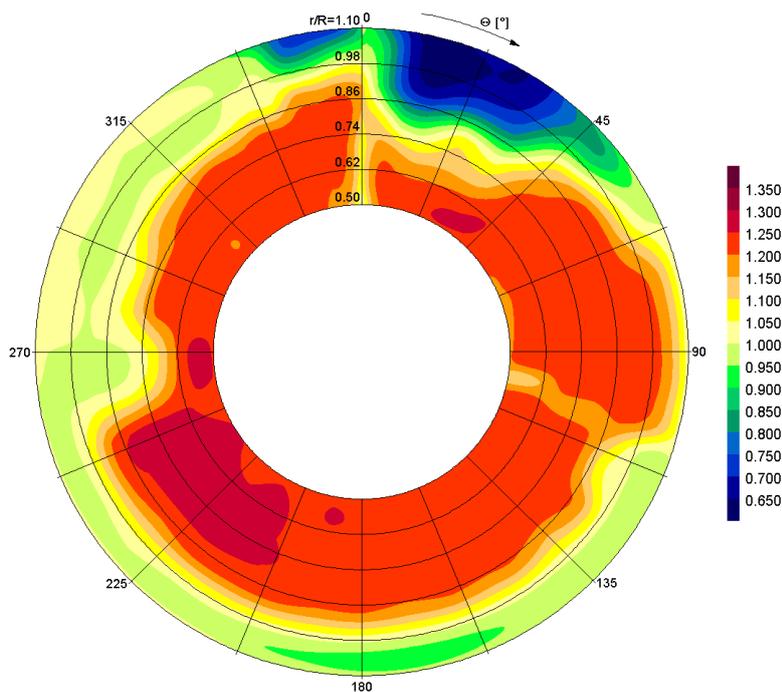


Bild 14: Mittlere axiale Geschwindigkeiten V_x/V_A in der Druckpropellerebene eines SSP-Systems im Nachstromfeld

5.2 Berechnung der viskosen Umströmung

Durch die Anwendung von CFD-Verfahren zur Berechnung der viskosen Umströmung des SSP-Systems mit arbeitenden Twinpropellern werden umfangreiche Informationen zur Optimierung des SSP-Systems bereitgestellt. CFD-Berechnungen mit SSP-Systemen wurden im Rahmen eines BMBF-Vorhabens im Auftrag der Firma Schottel durchgeführt [5], [6].

Berechnungsverfahren

Zur Berechnung der inkompressiblen turbulenten Strömung werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) und die Kontinuitätsgleichung numerisch gelöst. Die Modellierung der Reynolds-Spannungen erfolgt mit Hilfe des k - ε -Zweiglieders-Turbulenzmodells. In unmittelbarer Wandnähe wird das logarithmische Wandgesetz verwendet.

Eine Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen, der Kontinuitätsgleichung und der Gleichungen für das Turbulenzmodell kann nur numerisch erfolgen. Für die Lösung dieser partiellen Differentialgleichungen wird das Finite-Volumen-Verfahren verwendet. Dazu wird der Lösungsraum in einzelne Kontrollvolumina aufgeteilt. Die zu lösenden Gleichungen werden über diese Volumina integriert, diskretisiert und zu einem linearen Gleichungssystem approximiert.

Für die Berechnungen wurden das Rechenverfahren CFX-TASCflow verwendet. Das Rechenverfahren basiert auf einer konservativen Finite-Volumen-Methode und verwendet körperangepasste, nichtorthogonale, blockstrukturierte Rechengitter, in Verbindung mit kartesischen Geschwindigkeitskomponenten und einer nicht versetzten Variablenanordnung. Für die Lösung des resultierenden gekoppelten Gleichungssystems wird ein algebraisches Mehrgitterverfahren verwendet. Damit wird erreicht, daß die Rechenzeit etwa linear mit der Anzahl der Kontrollvolumina ansteigt.

Während die Massen- und die drei Impulserhaltungsgleichungen pro Iteration gekoppelt gelöst werden, werden die Turbulenzgleichungen einzeln gelöst. Die gekoppelte Lösung der Massen- und Impulserhaltungsgleichungen ist von großem Vorteil, da sie im Fall einer komplexen Strömung zu einem robusten, zuverlässigen und schnellen Algorithmus führt.

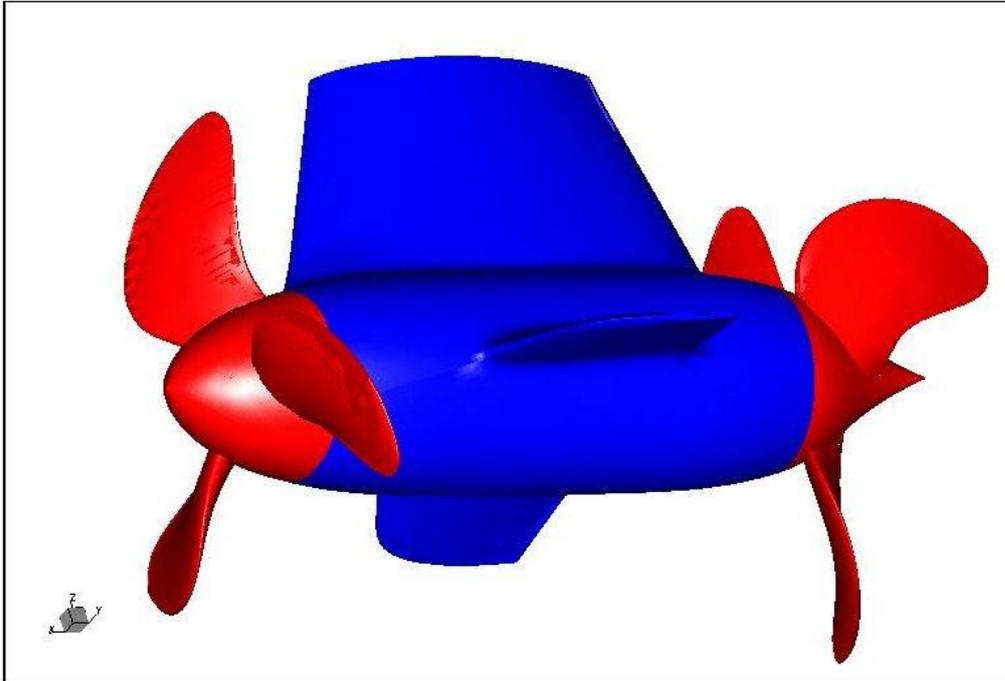
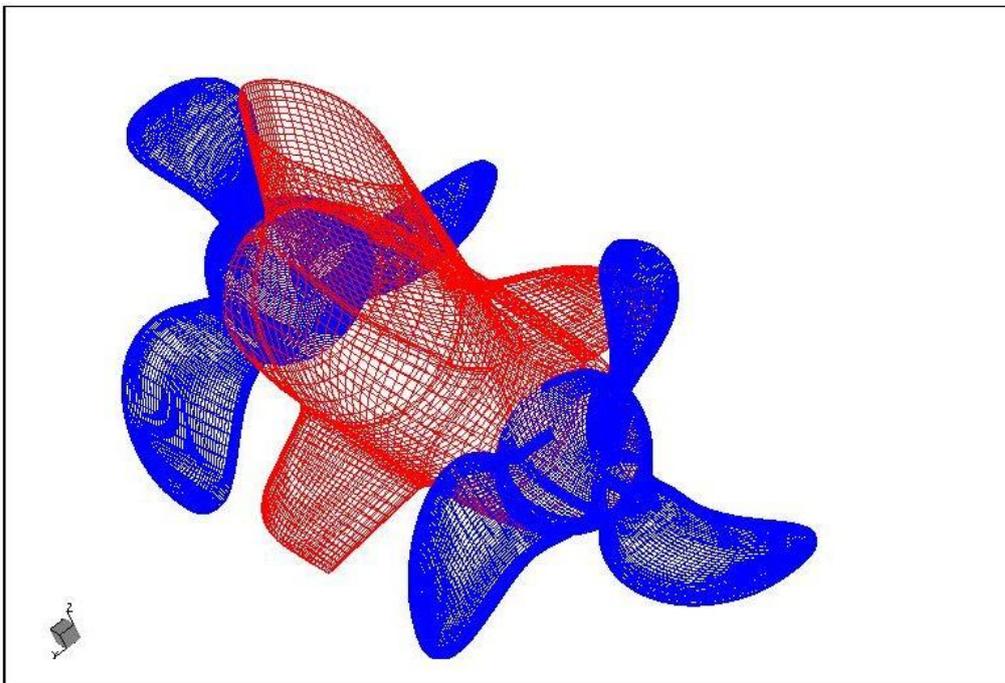
Randbedingungen

Das Rechengebiet erstreckt sich von 15 Propellerdurchmessern D vor dem ersten Propeller bis zu 30 D hinter dem zweiten Propeller, sowie jeweils 20 D nach beiden Seiten und 15 D nach unten. Der Schiffsboden wird durch eine waagerechte, ebene Platte simuliert.

Am Einströmrand und an den äußeren Rändern wird ungestörte Strömung angenommen. Die Anströmgeschwindigkeit entspricht der Schiffsgeschwindigkeit im Betriebspunkt. Am Ausströmrand wurden die Ableitungen der Geschwindigkeit in der Hauptströmungsrichtung gleich Null gesetzt. Die Wasseroberfläche wurde als reibungsfreie Wand angenommen. Die Verformung der Wasseroberfläche wurde in den viskosen Berechnungen nicht berücksichtigt. Die Simulationszeit betrug 10 s.

Rechengitter

Die untersuchte Geometrie des SSP-Systems ist im Bild 15 dargestellt. Bei den numerischen Berechnungen sowie bei der Erstellung des Rechengitters wurden die Konturen des Gehäuses, der Flügel und der Propeller vollständig simuliert. Für die numerischen Berechnungen wurden mehrere blockstrukturierte Rechengitter erzeugt. Für jeden einzelnen Block wird ein Rechengitter generiert. Die Zusammensetzung der Gitter aller Blöcke ergibt das Rechenetz für das gesamte Rechengebiet.

Bild 15: **SSP-System**Bild 16: **Rechengitter auf der Oberfläche des SSP-Systems**

Das Bild 16 zeigt das Rechengitter auf der Oberfläche des Antriebs. Bild 17 gibt einen Überblick über die Topologie des gesamten Rechengebietes. Die Blockgrenzen sind als schwarze Linien erkennbar. Das Rechengebiet besteht aus ortsfesten und rotierenden Teilen. Die zwei rotierenden

Teile enthalten die Rechengitter an den beiden Propellern. Der ortsfeste Teil umfaßt u.a. das Rechengitter am Podgehäuse. Das Bild 18 zeigt die rotierenden Gitter.

Für die Berechnungen wurde das Rechengebiet in 110 Blöcke unterteilt. Die Anzahl der Kontrollvolumina betrug 675000.

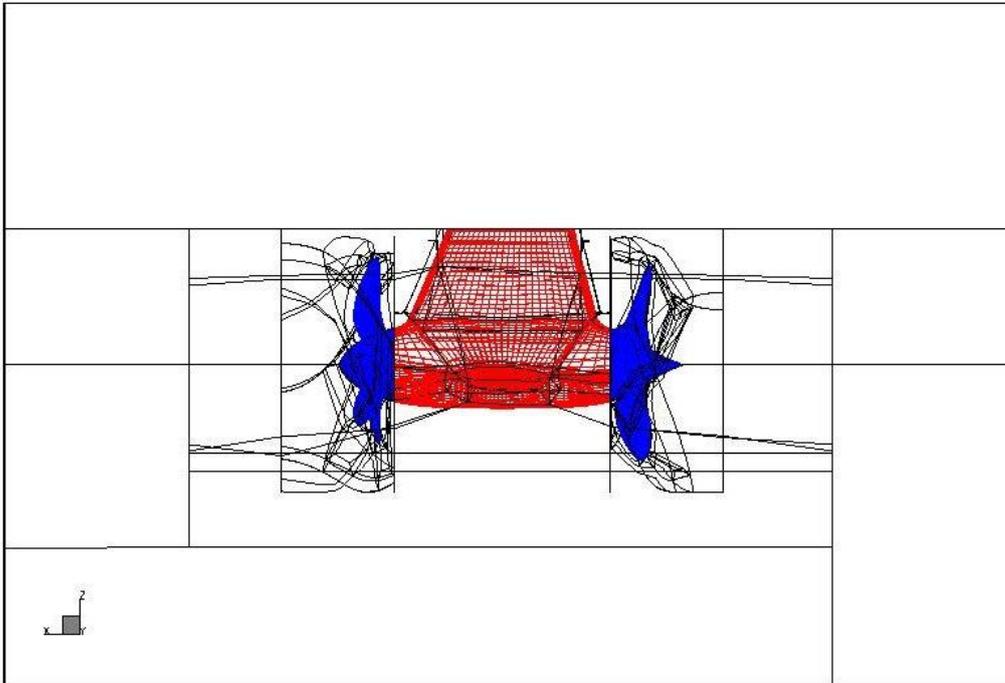


Bild 17: Topologie des Rechengitters

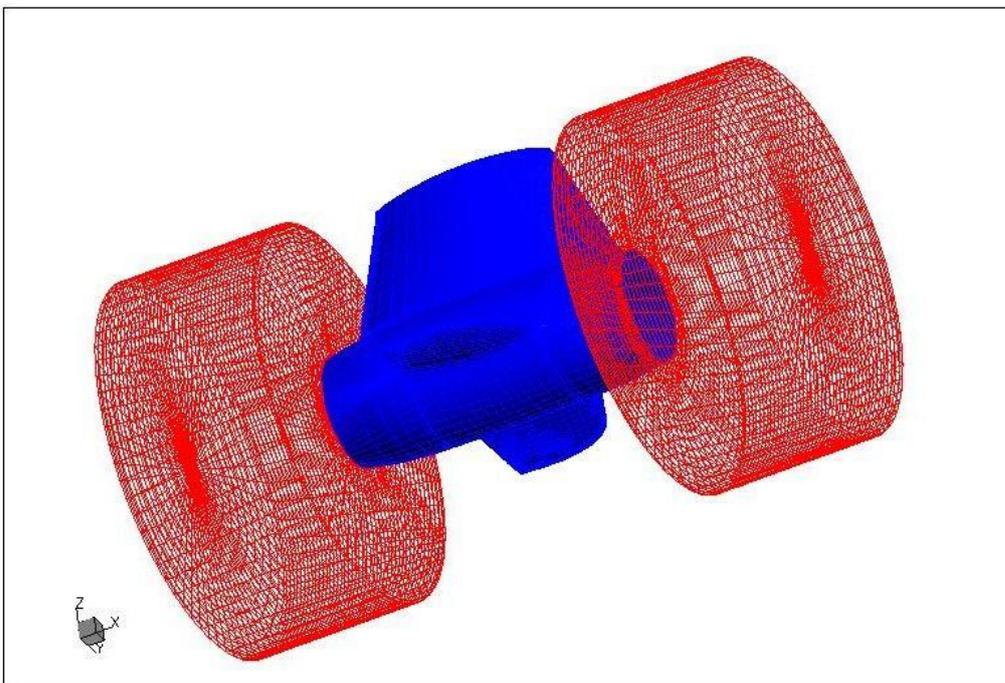


Bild 18: Rotierende Gitter im Rechengebiet

Ausgewählte Rechenergebnisse

Als Ergebnisse der viskosen Berechnungen werden die Druckverteilung auf dem Antrieb und die Isotachen der axialen Geschwindigkeitskomponente sowie die Geschwindigkeitsvektoren an bestimmten repräsentativen Stellen dargestellt. Die berechnete Druckverteilung wurde mit dem Staudruck normiert und als Druckkoeffizient dargestellt:

$$C_P = \frac{p - p_0}{0.5 * \rho * V_A^2}$$

Die Isotachen der axialen Geschwindigkeitskomponente wurden wie folgt normiert:

$$u_{\text{norm}} = \frac{u}{n * D}$$

wobei n die Drehzahl des Propellers und D der Propellerdurchmesser ist.

Die Bilder 19 und 20 zeigen die Druckverteilung auf der Oberfläche des SSP auf der Steuer- und Backbordseite. Höhere Drücke sind deutlich zu sehen an der Eintrittskante des Schaftes, der Nabe des ersten Propellers, den Eintrittskanten der Leitflossen und an den Eintrittskanten der Propellerflügel. Unterdruckgebiete sind auf den Saugseiten der Propeller und am Schaft vorhanden.

Auf Grund der Arbeit des Propeller und damit verbundenen tangentialen Geschwindigkeitskomponenten im Propellerstrahl ist das Unterdruckgebiet am Endes des Schaftes auf der Backbordseite größer als auf der Steuerbordseite. Zur Vermeidung einer möglichen Kavitationsgefährdung wurde die Geometrie des Schaftes in diesem Bereich modifiziert.

Die Bilder 21 und 22 zeigen die Geschwindigkeitsverteilung entlang eines Längsschnittes. Die Isotachen der axialen Geschwindigkeitskomponente im Bild 21 zeigen den Propellerstrahl und die Beschleunigung der Strömung durch beide Propeller. Deutlich höhere Geschwindigkeiten treten im Bereich des zweiten Propellers auf.

In den Bildern ist u.a. zu sehen, daß an der Nabe des hinteren Propellers eine Verlangsamung der axialen Geschwindigkeitskomponente auftritt. Durch eine Formänderung der Nabe und Ablaufkappe wurde hier eine Verbesserung erreicht.

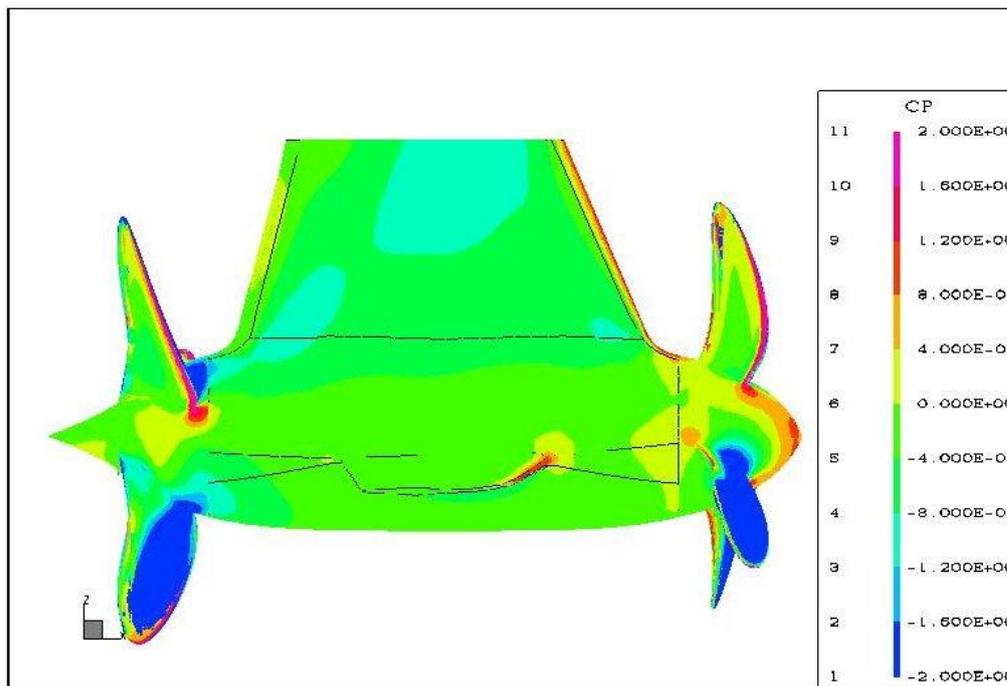


Bild 19: Druckverteilung auf der Oberfläche, Steuerbordseite

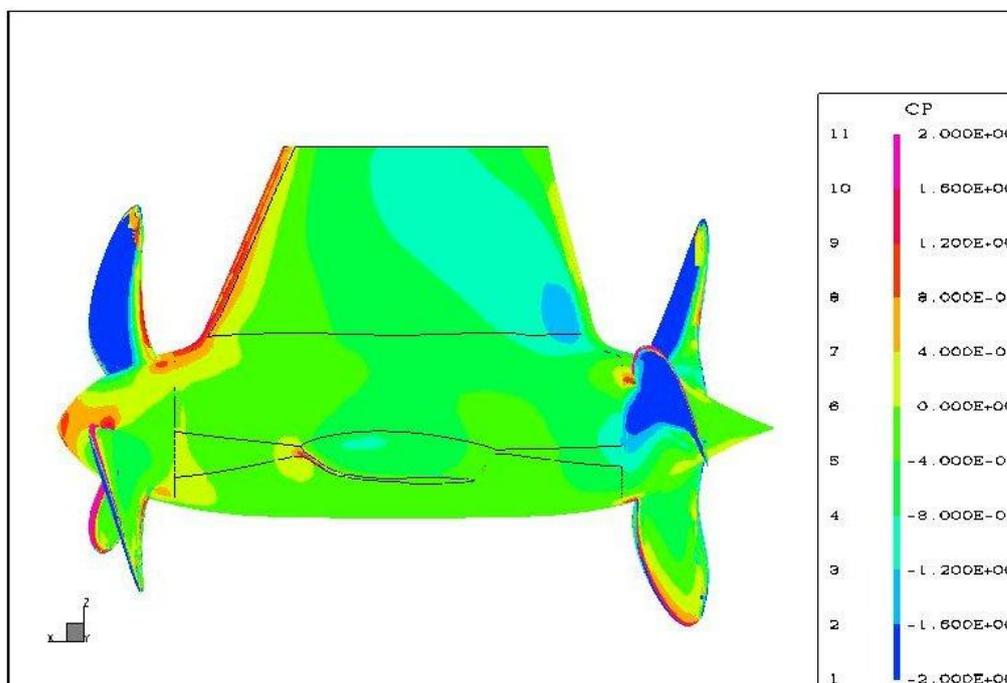


Bild 20: Druckverteilung auf der Oberfläche, Backbordseite

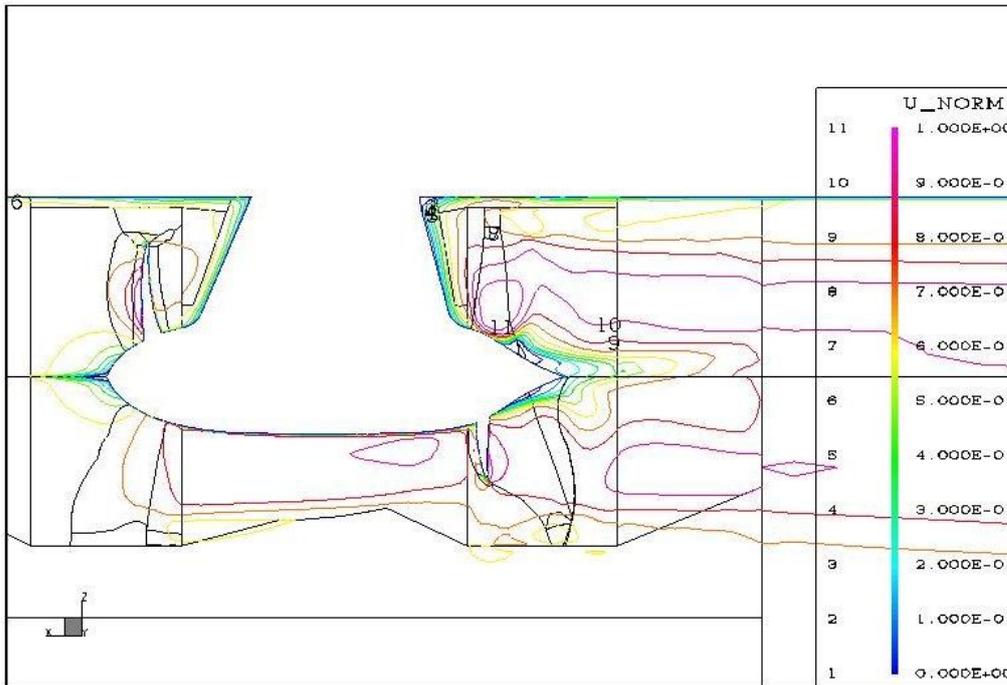


Bild 21: Isotachen der axialen Geschwindigkeitskomponente in der Längsschnittebene

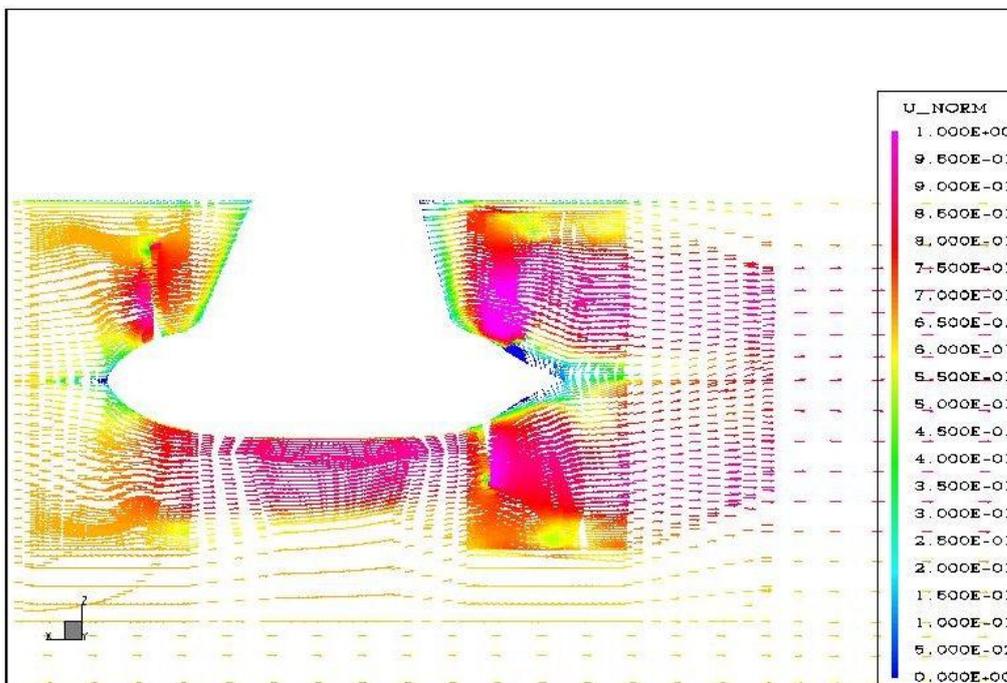


Bild 22: Geschwindigkeitsvektoren in der Längsschnittebene

6. Erprobung des ersten SSP-Prototypen und Anwendungen in der Großausführung

Der SSP ist eine gemeinsame Entwicklung der SIEMENS AG und der SCHOTTEL GmbH & Co. KG.

Die kennzeichnenden Merkmale sind:

- Der Permanentmagnetmotor (keine Fremderregung), der sich durch schlanke, strömungsgerechte Bauweise und höheren elektrischen Wirkungsgrad als herkömmliche E-Motoren auszeichnet. Die Entwärmung des Motors erfolgt durch natürliche Umströmung und nicht durch Fremdkühlung.
- Die Twin-Propeller-Technologie, zwei gleichlaufende Propeller mit dazwischen liegender Leit-einrichtung, wobei mit zunehmender Schubbelastung der Anwendung ein höherer Wirkungsgrad, niedrige Kavitationsneigung und niedrige Geräuschemissionen als mit herkömmlicher Propulsionstechnik zu erzielen sind.

Das elektromechanischen Prinzip und die hydrodynamischen Aspekte des SSP wurden auf der letzten STG-Fachaussschußsitzung „Schiffshydrodynamik“ am 08.10.1998 erläutert.

Die Erprobung des ersten Prototypen wurde abgeschlossen und es liegen Aufträge über die Lieferungen von 6 Schiffen mit drei verschiedenen Antriebsgrößen vor. Im folgenden soll über Aspekte der Großausführung und der unterschiedlichen Anwendung berichtet werden.

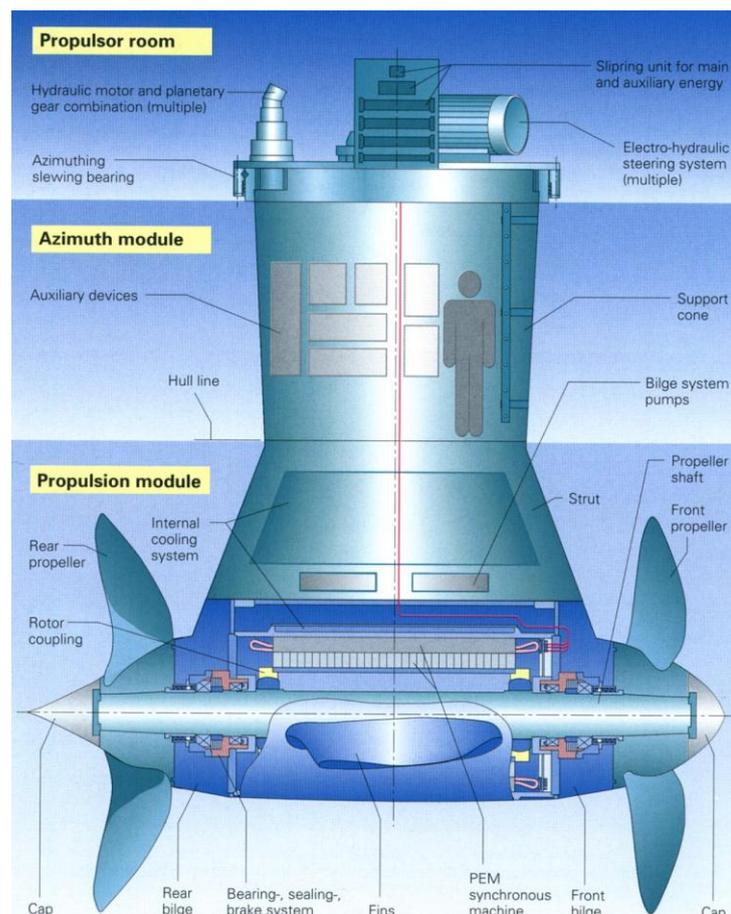


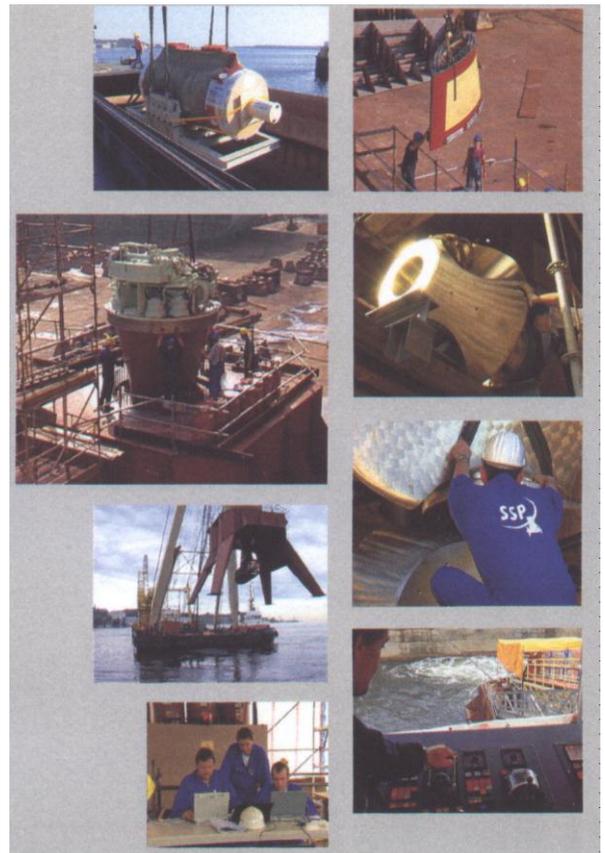
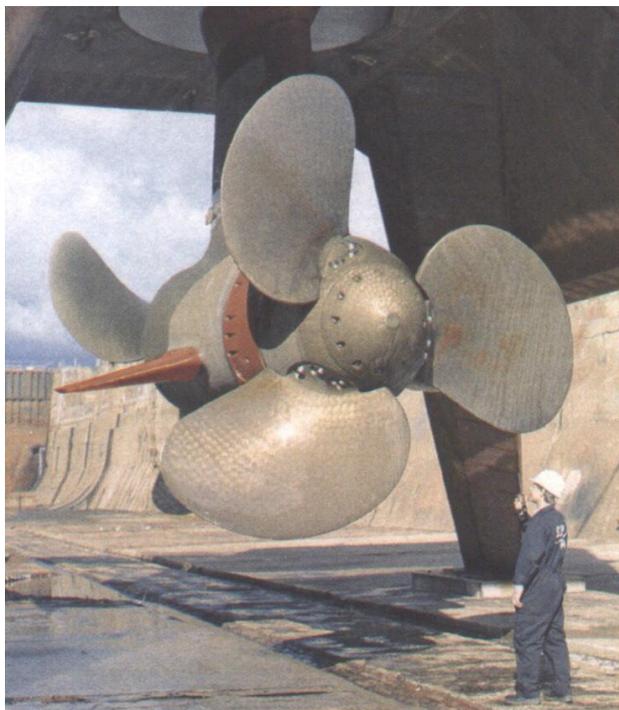
Bild 23: SSP – Funktionsprinzip und wesentliche Komponenten

6.1. Erprobung des ersten SSP-Prototypen

Im Herbst 1999 wurde der erste Prototyp des SIEMENS SCHOTTEL Propulsor SSP 7 (Leistungsgröße 7 MW) in einem gefluteten Dock der Howaldtswerke Deutsche Werft AG in Kiel erprobt und umfangreichen Tests unterzogen.

Dabei wurde die Anlage sowohl mit maximaler Drehzahl als auch mit maximalem Drehmoment, d.h. maximaler Motorbelastung und Motorerwärmung dauerhaft betrieben. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Propellersteigungen für die Strömungsverhältnisse im Dock eingestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Dockerprobung:



Bilder 24 + 25: Dockerprobung des ersten SSP-Prototypen

Die mechanischen Bauteile Lagerung, Dichtung, Kupplung sowie das Azimutlager für die 360°-Steuerung der Anlage wurden umfangreichen Prüfungen unterzogen. Die Entwärmung des Motors ohne Fremdkühlung als wesentlichster Aspekt des Motorenkonzeptes wurde ausführlich untersucht. Die erwarteten lokalen Temperaturwerte wurden nicht überschritten.

Bis auf weniger nennenswerte Startschwierigkeiten verlief die Erprobung zufriedenstellend.

6.2. Aktuelle Anwendungen in der Großausführung

Hauptantrieb für einen Einschrauben Chemikaliertanker

L_{PP} = 132,00 m
B = 22,00 m
T = 9,25 m
Disp. = 21686 m

Bauwerft: Shanghai Edwards Shipyard
Eigner: DONSÖ Rederei DONSÖ-SWEDEN
SSP: SSP 7 mit 5100 kW
Ablieferungstermin: 06/2000

Der Produktentanker ist mit einem SSP 7 als Einschrauber ausgerüstet. Die installierte Propulsionsleistung beträgt 5100 kW mit der eine Schiffsgeschwindigkeit von 14,5 Knoten erreicht werden soll.

Es wurden umfangreiche Modellversuche bei der SVA Potsdam, bei CTO-Gdansk und Manöversimulationen bei SSPA-Göteborg durchgeführt. Zusätzlich wurden CFD-Berechnungen in der SVA Potsdam zur Optimierung des SSP-Systems realisiert (siehe Abschnitt 5).

Die Werfterprobung hat bereits stattgefunden. Die offizielle Probefahrt findet in der zweiten Septemberwoche statt. Die bisherigen Erprobungsergebnisse sind zufriedenstellend. Der Drehmomentenbeiwert des SSP-Propellersatzes liegt geringfügig unter den Prognosewerten. Aus den vorläufigen Analysen der Propulsion in der Großausführung kann entnommen werden, daß die Extrapolation der Modellversuchsergebnisse in die Großausführung eher zurückhaltend gewählt war. Die Analyse der anstehenden Sea Trials wird ein hilfreiches und wichtiges Instrument für die Bewertung der experimentellen und numerischen Ergebnisse und Korrekturmethode sein.

Die Beweggründe für die Auswahl des Podded Drives:

Der diesel-elektrische Antrieb war aufgrund des universellen Einsatzes der elektrischen Energie (z.B. für die Pumpen) gesetzt. Durch die Anordnung der Antriebsmaschine außerhalb des Rumpfes und die flexible Anordnung der Umrichter und Generatoren konnte zusätzlicher Cargo-Raum von ca. 16 % geschaffen werden bzw. ein kürzeres und damit kostengünstigeres Schiffskonzept umgesetzt werden. Hinzu kommen noch die guten Manöviereigenschaften bei langsamer Fahrt und die Möglichkeit mit guten Propulsionseigenschaften auch rückwärts zu fahren, was insbesondere im Eis von Bedeutung ist.

Die folgenden Abbildungen zeigen Schiff und Anlage beim Stapellauf.



Bilder 26 - 31: Chemikalien-tanker PROSPERO mit 1 x SSP 7 (5100 kW)

Ergänzungsantrieb für einen Kreuzfahrerumbau

L_{PP} = 226,77 m
B = 30,80 m
T = 7,30 m
Disp. = 37352 m

Bauwerft: Cammell Laird Shipyard, Birkenhead-England
Eigner: Prestige Cruises, Costa Cruises
SSP: SSP 7 mit 8000 kW
Ablieferungstermin: 03/2001

Das Kreuzfahrtschiff COSTA CLASSICA wurde bislang mit zwei konventionellen Wellenanlagen betrieben. In den kommenden Wintermonaten wird eine Schiffsverlängerung vorgenommen und ein zusätzlicher SSP 7 mit einer Leistung von 8000 kW zentral zwischen die vorhandenen Wellenanlagen plziert. Der Propellerentwurf und die experimentelle Überprüfung der Kennwerte des SSP-Systems erfolgte in der SVA Potsdam. Im Entwurfsprozeß wurden u.a. die Flügelzahlen der Twinpropeller mit $Z = 3 + 3$ und $Z = 4 + 4$ variiert.

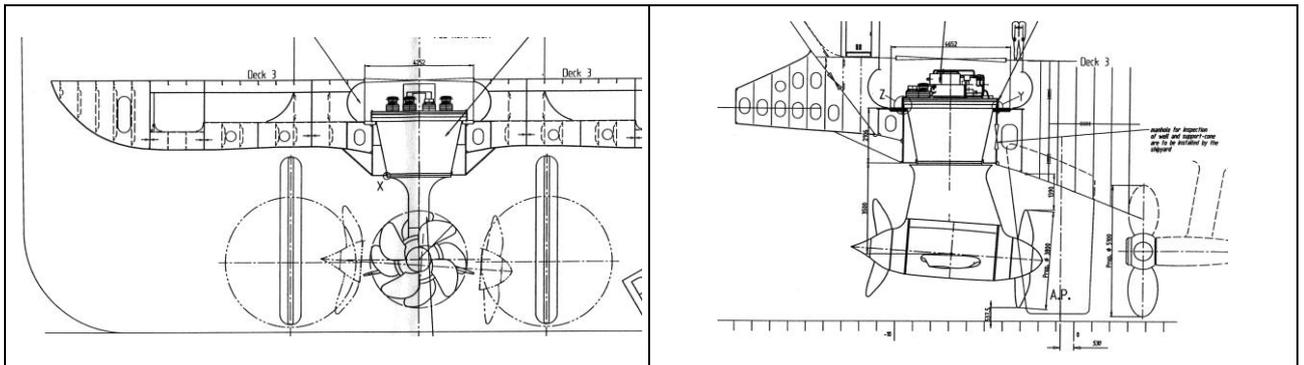
Es wurden mit großem Aufwand umfangreiche Modellversuche bei der HSVA Hamburg durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf der Ermittlung der optimalen Leistungsverteilung und Positionierung des SSP sowie der Untersuchung der Wechselwirkungen von drei derart angeordneten Propulsoren insbesondere im Hinblick auf hydrodynamisch erregte Vibrationen. Dazu wurden Schwenk- und Driftversuche durchgeführt, um Veränderungen der Dynamik in Schub und Drehmoment zu analysieren. Weiterhin wurde das vollständig ausgerüstete Modell im HYKAT der HSVA in verschiedensten Betriebsarten untersucht.

Die Beweggründe für die Auswahl des Podded Drive / SSP:

Beim Umbau eines Schiffes in dieser Weise kann sowohl Vor- als auch Achterschiff mit Hauptmaschinenanlage, Motoranordnung und Wellenleitung unverändert bleiben. Der Podded Drive wird einfach ergänzt und stellt die zusätzliche Leistung für die erhöhte Geschwindigkeitsforderung von nunmehr 22,5 Knoten bereit. Eine Leistungssteigerung auf den Wellenanlagen würde einen vollständigen Umbau aller Antriebskomponenten (Wellen, Wellenlagerung, Motoren, Fundamentierung usw.) erfordern. Der Center-PoD ist hinter dem Mittelskeg des Schiffes plziert und arbeitet somit in der durch denselben verursachten Nachstromdelle. Durch die Auswahl des SSP in Twin-Ausführung wird zum einen die Leistung auf zwei Propeller verteilt und zum anderen kann ein vergleichsweise kleiner Propellerdurchmesser mit komfortablem Freischlag realisiert werden, ohne Wirkungsgradeinbußen wie bei einem Einzelpropeller mit Durchmesserreduzierung in Kauf nehmen zu müssen. Diese Eigenschaften haben im Vergleich, dem sich alle 4 Podded Drive Anbieter im Versuch gestellt haben, den Ausschlag für den SSP gegeben. Die Druckschwankungsamplituden des SSP wurden im Hauptbetriebsbereich des Fahrprofils mit maximal 0,6 kPa gemessen.

Damit ist das Podded Drive System auch eine kostengünstige und elegante Alternative für Umbauprojekte.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Kreuzfahrer und der SSP-Einbau.

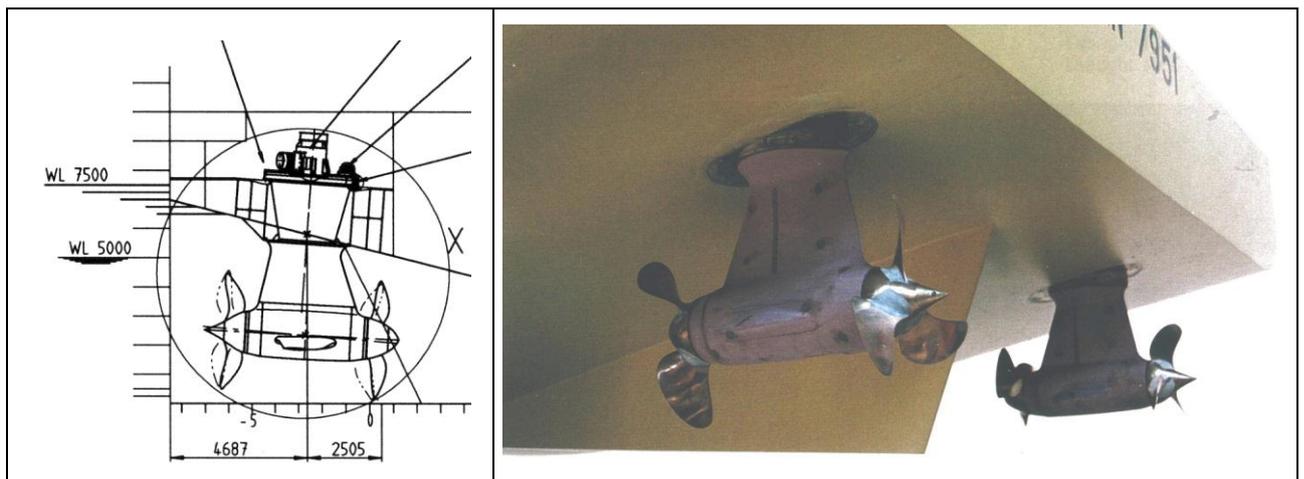


Bilder 32 - 34: Kreuzfahrtschiff COSTA CLASSICA mit 1 x SSP 7 (8000 kW)

Hauptantrieb für einen Zweischrauben Heavy Lift Carrier

L_{PP} = 145,00 m
 B = 32,20 m
 T = 6,50 m
 Disp. = 21732 m

Bauwerft: Guangzhou Shipyard International in P.R. China
 Eigner: COSCO
 SSP: SSP 5 mit 4725 kW



Bilder 35 - 37: Heavy Lift Carrier für COSCO mit 1 x SSP 5 (4725 kW)

Es werden 2 Schiffe des Heavy Lift Carriers gebaut. Installiert sind zwei SSP-Anlagen des Typs SSP 5 mit einer Leistung von jeweils 4725 kW. Es wurden umfangreiche Versuche bei MARIN hinsichtlich Propulsion, Manövrieren und Verhalten im Seegang durchgeführt.

Die Beweggründe für die Auswahl des Podded Drive / SSP:

Der Heavy Lift Carrier sollte aufgrund der hohen Anforderungen an die Manöviereigenschaften mit steuerbaren Ruderpropellern ausgerüstet werden. Von großem Vorteil beim SSP ist die kompakte Bauweise im Innenschiffsbereich und im Speziellen die natürliche Entwärmung der Maschine ohne Fremdkühlung. Die Abluft wird in der Regel durch die Säulen vorgenommen. Da diese über die ganze Schiffslänge verfahrbar sind, erfordert dieses i.d.R. komplizierte Maßnahmen, falls der PoD-Raum „entlüftet“ werden muß. Beim SSP ist das nicht erforderlich, da dieser keine Fremdkühlung benötigt.

Hauptantrieb für eine Zweischrauber RoRo-Fähre

L_{PP} = 175,00 m
B = 29,50 m
T = 6,20 m
Disp. = 21150 m

Bauwerft: SSW Fähr- und Spezialschiffbau GmbH, Bremerhaven
Eigner: TT-Line GmbH & Co., Lübeck-Travemünde
SSP: SSP 10 mit 11000 kW
Ablieferungstermin: 02/2001 und 07/2001

Für die Verbindung Travemünde-Traelleborg wurden von TT-Line zwei baugleiche Fährschiffe bei SSW in Bremerhaven in Auftrag gegeben. Installiert werden zwei SSP-Anlagen des Typs SSP 10 mit einer Leistung von 11 MW je Propulsor. Der Propellerentwurf und die Überprüfung der Freifahrt- und Kavitationseigenschaften erfolgte in Zusammenarbeit mit der SVA Potsdam. In diesem Zusammenhang wurden auch CFD-Berechnungen zur Optimierung der Gehäuseform durchgeführt.

Bei der SVA in Wien wurden ausführliche Modellversuche (Propulsion, Manövrieren, Seegang, Kavitation) durchgeführt, die u.a. auch dazu dienten herauszufinden welcher Poded Drive im Vergleich die beste Propulsion bietet. Das Azimuthmodul ist bereits im ersten Schiff eingebaut. Die ersten Erprobungen des E-Systems sind für November geplant.

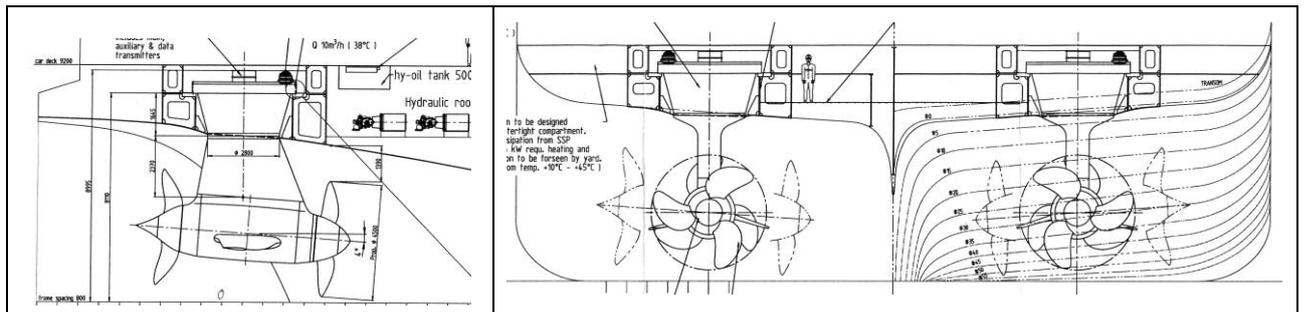
Die Beweggründe für die Auswahl des Poded Drive / SSP:

Die Auswahl ein diesel-elektrisches Schiff mit hoher Manövrierfähigkeit, insbesondere im Hafen, zu bauen führte zur Entscheidung für den Poded Drive. Im Propulsionsversuche konnte ein deutlicher Wirkungsgradvorteil des SSP gegenüber dem Wettbewerber nachgewiesen werden.

Die sehr kompakte Bauweise des SSP ist ein weiterer Vorteil, der hier zum Tragen kommt. Aufgrund des niedrig liegenden Fahrdecks ist es erforderlich ein niedrig bauendes Azimuthmodul zu realisieren. Das ist der Teil, der im Schiff einfundamentiert wird und das Schwenklager beinhaltet. Der flache Einbau ist eine besondere Forderung bei allen Fährschiffen dieser Art. Ist der Poded Drive zu groß, kann dieser nicht installiert werden oder muß tiefer in eine sogenannte Headbox installiert werden, die unterhalb des eigentlichen Rumpfes herausragt, was verständlicherweise zu Nachteilen in der Propulsion führt.

Der Twin-Propeller konnte bei der Ro-Ro-Fähre aufgrund des eingeschränkten Propellerdurchmessers und der hohen Schubbelastung (Flachwasserbetrieb auf der Ostsee) seine Wirkungsgradvorteile nachweisen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Fähre und den SSP-Einbau.



Bilder 38 - 40: RoRo-Fähre für TT-Line mit 2 x SSP 10 (11000 kW)

Hauptantriebe für schnelle RoRo-Fähren

Der Markt der schnellen RoRo-Fähren ist ein Wachstumsmarkt. Auch hier arbeitet das SSP-Consortium an innovativen Lösungen bis hin zu ganzen Schiffskonzepten.

In diesem Marktsegment wird von einem Geschwindigkeitsbereich von 26 – 29 Knoten gesprochen mit Trend bis hin zu 32 Knoten.

Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit wird der Entwerfer und Ausleger von Podded Drives und Propellern für Podded Drives vor folgende Probleme gestellt:

Die Propellerdurchmesser bleiben bei schnellen Schiffen auch aufgrund des niedrigen Tiefganges klein. Die Druckhöhe über dem Propeller ist ebenfalls sehr gering. Die Gondel des Podded Drives muß schlank bleiben. D.h. der Motordurchmesser darf nicht zu groß werden. Das beschränkt das maximal umsetzbare Drehmoment.

Diese Einschränkungen führen zu großen Propellerdrehzahlen (großen Umfangsgeschwindigkeiten). Die Kavitationsgefährdung des Propellers nimmt zu und auch der Anströmwinkel zum Gehäuseschaft wird groß, so daß es bereits bei Geradeausfahrt zu Ablösung und Kavitation am Schaft kommen kann. Die Folgen sind Druckschwankungsamplituden, die zu inakzeptablen Geräuscheintrag in die Schiffsaußenhaut führen können. Weiterhin können Erosions-, Dreh- und Biegeschwingungsprobleme auftreten.

Um dieser Problematik gerecht zu werden, hat SCHOTTEL einen Podded Drive für diesen Geschwindigkeitsbereich entwickelt mit spezieller Propellerauslegung und spezieller geometrischer Gestaltung von Naben, Übergang zur Gondel, Nabenablauf und des Schaftes. Grundsätzlich bietet auch hier bei der hohen Leistungskonzentration auf dem Propeller schneller Anwendungen die Leistungsverteilung auf zwei Propeller, gemäß dem Twin-Propeller-Prinzip, den höchsten Wirkungsgrad.

7. Zusammenfassung

Die Entwicklung der Podded Drives erfordert intensive, langwierige Forschungsarbeiten. Aspekte der Hydrodynamik von Podded Drives und ausgewählte Untersuchungsergebnisse mit allgemeinem Charakter wurden erläutert. Am Beispiel des SSP-Systems wurde der Einsatz von Modellversuchen und numerischen Untersuchungen zur Entwicklung des Antriebssystems dargestellt.

Weiterhin wurden einige Beispiele aus der jungen Praxis dargelegt. Diese Beispiele zeigen die Vielfältigkeit von Podded Drive-Anwendungen und Beweggründe, Podded Drives zu installieren. Ein wesentlicher Schritt wird die Bewährung der Podded Drive Systeme im Einsatz sein sowie die Rückmeldung der Großausführungsergebnisse zum Abgleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse und Extrapolationsverfahren.

8. Literatur

- [1] Andersson, J. ; Eloranta, S. et al.
B-MAX A new approach in ro-ro design
RoRo98 Conference May 12-14, 1998 – Gothenburg
- [2] Mewis, F.
Podded Drives im Vormarsch, Hydrodynamische Aspekte
Schiff & Hafen 11/98
- [3] Abdel-Maksoud, M.; Heinke, H.-J.
Investigation of Viscous Flow Around Modern Propulsion Systems
CFD '99, The International CFD Conference, 5-7 June 1999, Ulsteinvik
- [4] Fung, S.; Karafiath, G.; McCallum, D.
U.S. Navy Sealift Hydrodynamic Investigations
NSWC, Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, 1998
- [5] Abdel-Maksoud, M.
Application of a RANS-Method to investigate Scale Effects on the Performance of Modern
Propulsion Systems
2. International Towing Tank Symposium, Rome, August, 1999
- [6] Wuttke, H.
Numerische Simulation der stationären Umströmung des SSP7-Antriebs mit den Propellern
VP1315 und VP1316
Bericht Nr. 2512, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Februar 2000 (unveröffentlicht)