

Hocheffektive Ruder

Dipl.-Ing. **Hans-Jürgen Heinke**, Dipl.-Ing. **Karsten Rieck**, Dipl.-Ing. **Marc Steinwand**
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, info@sva-potsdam.de

Kurzfassung

Aufgrund der immer größer werdenden Anforderungen an Ruder bezüglich der Kavitationsarmut und der Leistungsfähigkeit sind an der SVA Potsdam unterschiedlichste Aspekte Gegenstand der Forschung geworden. Es wurden unter anderem kavitationsarme Profile in den Konfigurationen konventionell, Fish Tail und Flap entwickelt. Dabei konnten weitere Verbesserungen zu bisher bekannten kavitationsarmen Profilen erzielt werden. Verschiedene Ruderkonfigurationen mit Ruderbirne sind mit Propeller- und mit Schiffsrumpf-Propeller-Einfluss numerisch und experimentell untersucht worden. Die günstigsten Randbedingungen für den Einsatz von Ruderbirnen und deren Effektivität wurden herausgearbeitet. Ein Aktivrudder mit Elektromotor, welches aktives und passives Steuerorgan in einem repräsentiert, ist untersucht worden. Die Eigenschaften einer solchen Konfiguration sind in diesem Artikel dargestellt.

Abstract

Due to the ever more largely becoming requirements at rudders concerning the cavitation and the efficiency different aspects were the subject of the SVA Potsdam research. Among other things cavitation-poor profiles in the configurations conventionally, Fish Tail and Flap were developed. Further improvements to well-known cavitation-poor profiles could be obtained. Different rudder configurations with rudder bulb were examined numerically and experimentally with propeller and with hull-propeller influence. The most favorable boundary conditions for the employment of rudder bulbs and their effectiveness were worked out. An active rudder with electric motor, which represents active and passive control in one, was examined for its superiority opposite a conventional rudder. The characteristics of such a configuration are represented in this article.

Keywords:

Rudder; Rudder cavitation; Rudder bulb; Active rudder

1. Einleitung

Wirtschaftliche und technische Anforderungen machen es zu Beginn des 21. Jahrhunderts notwendig, die hydrodynamischen Aspekte eines Ruders neu zu überdenken und innovative Lösungen zu finden. Ruder sollen sich u.a. günstig auf die Propulsion des Schiffes auswirken und eine möglichst gute Steuerfähigkeit auch bei Revierfahrt gewährleisten. Weiterhin muss beim Ruderentwurf der Entwicklung in der Schifffahrt zu höheren Schiffsgeschwindigkeiten und höheren Antriebsleistungen Rechnung getragen werden. Fragen der Kavitations- und Erosionssicherheit spielen dabei eine zunehmende Rolle. Die SVA Potsdam hat in den letzten Jahren verstärkt auf dem Gebiet der Ruderoptimierung Forschung und Entwicklung betrieben. Ausgewählte Forschungsergebnisse sollen in diesem Beitrag vorgestellt werden.

2. Ruderprofile

Ruder am Heck eines Schiffes sind nach wie vor das effektivste Mittel zur Erzeugung einer Querkraft am Achterschiff zum Manövrieren bei Fahrt. Durch die Anordnung des Ruders im Propellerstrahl können auch bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten und im Stand Querkräfte erzeugt werden. Durch den Propellerstrahl wird das Ruder inhomogen angeströmt. Das betrifft sowohl axiale als auch tangentielle Strömungskomponenten. Hieraus resultieren die meisten Ruderprobleme, wie der plötzliche Abfall der Ruderquerkräfte bei großen

Ruderwinkeln durch Ablösung der Strömung, die Ruderkavitation und speziell die kavitationsbedingte Rudererosion. Kavitationsbedingte Ruderschäden treten in den letzten Jahren gehäuft auf, weil die Schiffsgeschwindigkeiten und die Leistungen am Propeller zunehmen.

Bei der Kavitation und der Zerstörung des Materials des Ruderblattes durch Kavitationserosion lassen sich zwei Ursachen unterscheiden, *Kracht (1987); Kracht (1992)*:

- Fremdkavitation - Die vom Propeller erzeugten Kavitationsblasen, die den Propeller verlassen, fallen auf dem Ruderblatt zusammen (Spitzenwirbel- und Nabenwirbelkavitation).
- Eigenkavitation - Entsteht infolge hoher induzierter Geschwindigkeiten im Propellerstrahl an Stellen mit starken Krümmungsänderungen, Kanten, Öffnungen usw. Am freien Ende des Ruders bildet sich ein Spitzenwirbel aus, der Ursache für die Rudersohlenkavitation ist.

Das Risiko der Eigenkavitation lässt sich durch kavitationsarme Profile und eine Rudergeometrie, die an die hydrodynamischen Bedingungen innerhalb des Propellerstrahls besser angepasst sind, mindern.

Ausgehend von den bekannten HSVA Mischprofilen MP 71-20 und MP 73-20 wurden potenzialtheoretische und viskose Berechnungen zur Optimierung der Druckverteilung der Profile durchgeführt. Im Ergebnis der Berechnungen wurde das Mischprofil MP SVA-22 für weitergehende CFD-Berechnungen und Versuche ausgewählt. Zur Untersuchung des Einflusses eines Fish Tails und eines Flaps auf die Kennwerte und die Kavitationseigenschaften wurde das Profil mit einem Fish Tail (MP SVA-22 FT) und mit einem Flap (MP SVA-22 Flap) versehen [Fig. 1], [Tab. 9]. Der Flapwinkel beträgt $\alpha_F = 2\delta_R$, die Flapfläche $A_{FL} = 17,5\% A_R$ und die Drehachse des Flaps liegt bei 20% der Sehnenlänge.

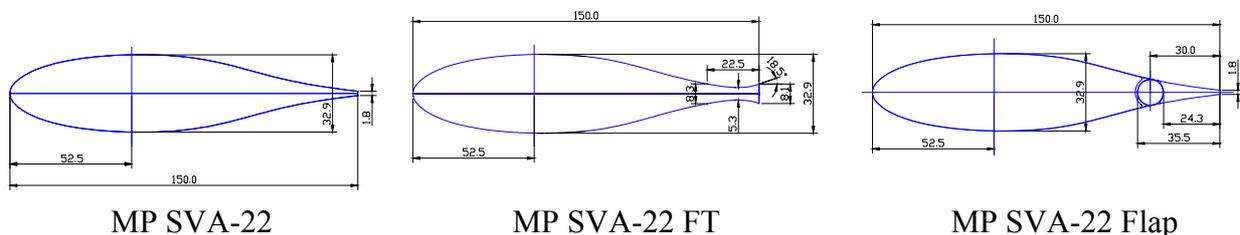


Fig. 1 MP SVA-22 as basic profile, with fish tail and with flap (model scale)

2.1 Profilkennwerte

Die Kennwerte der Profile MP 71-20, MP 73-20, MP SVA-22 wurden mit verschiedenen Verfahren berechnet und im Kavitationstunnel der SVA gemessen, *Heinke et. al (2004a)*. Die Tabelle 1 enthält die Hauptdaten der Profile. Die Tabelle 2 zeigt die mit dem Verfahren CFX-TASCflow berechneten Kennwerte der Profile. Die minimalen Druckbeiwerte des Profils MP SVA-22 liegen unter den Werten der Vergleichsprofile, die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte liegen im Bereich des Profils MP 71-20.

Tab. 1 Main data of the profiles (model scale)

Profil		MP 71-20	MP 73-20	MP SVA-22
Profilfläche	A_m [m ²] :	0,0585	0,0585	0,0585
Profillänge	c_m [mm] :	150	150	150
maximale Dicke	d [mm] :	30	30	33
Dickenrücklage	x_d [%] :	45	30	35
Profilbreite	b [mm] :	390	390	390
Streckungsverhältnis	Λ [-] :	2,60	2,60	2,60
Abstand zw. Vorderkante und Drehachse	e [m] :	0,0675	0,0450	0,0525

Tab. 2 Calculated coefficients for profiles MP 71-20, MP 73-20, MP SVA-22, $\Lambda = \infty$, $R_n = 7,5 \cdot 10^5$

Winkel [°]	MP 71-20			MP 73-20			MP SVA-22		
	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]
0,0	0,0140	0,000	-0,74	0,0140	0,000	-0,71	0,0150	0,000	-0,63
5,0	0,0167	0,571	-1,71	0,0161	0,591	-1,59	0,0188	0,527	-1,30
10,0	0,0331	0,948	-3,87	0,0243	1,121	-3,22	0,0330	0,907	-2,40
15,0	0,0639	1,144	-6,02	0,0698	1,241	-4,32	0,0615	1,139	-4,05

In Modellversuchen wurden die Kennwerte und die Kavitationseinsatzkurven der Profile in homogener Anströmung und im Propellerstrahl untersucht. Der Vergleich der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte der Profile in homogener Anströmung zeigt, dass das Mischprofil MP SVA-22 im Anstellwinkelbereich $\pm 15^\circ$ im Bereich des Profils MP 71-20 liegt. Bei größeren Anstellwinkeln liegen die Kennwerte des Profils MP SVA-22 zwischen den Kennwerten der Profile MP 71-20 und MP 73-20 (Bild 2).

Der Vergleich der gemessenen Kavitationseinsatzkurven der Profile in homogener Anströmung [Fig. 3, links] zeigt, dass bei kleinen Anstellwinkeln im Bereich von $\pm 10^\circ$ die Profile MP 71-20 und MP SVA-22 die günstigsten Kavitationseigenschaften aufweisen. Bei größeren Anstellwinkeln setzt am Profil MP 73-20 die Kavitation bei den kleinsten Kavitationszahlen ein. Zu beachten ist bei diesem Vergleich, dass sich die Kavitationsarten bei den Anstellwinkeln unterscheiden. Am Profil MP SVA-22 tritt bis $\pm 22^\circ$ nur Blaskavitation auf. Diese Kavitationsart tritt beim Profil MP 73-20 im Winkelbereich $\pm 12^\circ$ und beim Profil MP 71-20 bis $\pm 9^\circ$ auf. Bei größeren Anstellwinkeln setzt bei diesen Profilen die Kavitation als Schichtkavitation ein. Bei den berechneten minimalen Druckbeiwerten ergeben sich qualitativ ähnliche Tendenzen in der Kavitationsgefährdung [Fig. 3, rechts].

Die Untersuchungen haben insgesamt gezeigt, dass es großer Anstrengungen bedarf, um bewährte Ruderprofile noch weiter zu optimieren. Die bekannten Mischprofile der HSVA sind schon effektive Profile für Schiffsrudder. Das optimierte Profil MP SVA-22 erreicht bei den Ruderkräften unter praxisrelevanten Bedingungen, d.h. im Propellerstrahl, annähernd die Güte des Profils MP 73-20. In den Kavitationseigenschaften werden mit dem Profil MP SVA-22 jedoch bessere Werte erzielt.

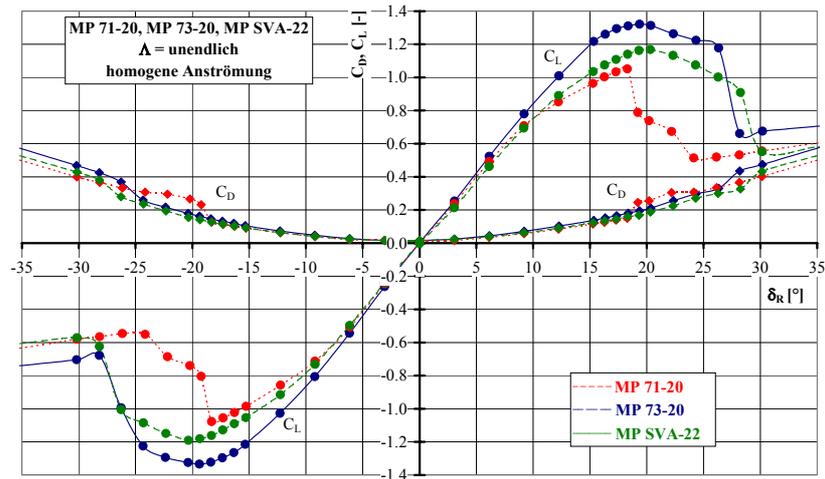


Fig. 2 Drag and lift coefficients, profiles MP 71-20, MP 73-20, MP SVA-22, $\Lambda = \infty$, homogeneous inflow

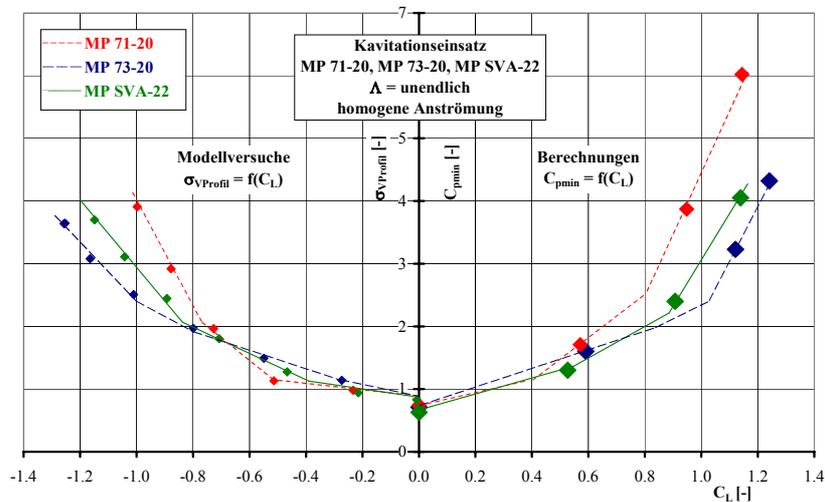


Fig. 3 Cavitation buckets (model tests) and minimum pressure coefficients (calculations), profiles MP 71-20, MP 73-20, MP SVA-22, $\Lambda = \infty$

3. Vollscheiberuder

Ruder mit einem Streckungsverhältnis von $\Lambda = 1,969$ mit den Profilen MP SVA-22, MP SVA-22 FT und MP SVA-22 Flap [Fig. 1] wurden in homogener Zuströmung und im Propellerstrahl rechnerisch und experimentell untersucht. Die Tabelle 3 enthält die Geometriedaten der Ruder, Bild 4 zeigt die Propeller-Ruder-Anordnung in der Berechnung und im Versuch.

Tab. 3: Main data of the rudders

Ruderfläche	A_m [m ²]	: 0,044196
Ruderlänge	c_m [mm]	: 150
maximale Dicke	d [mm]	: 33
Profilbreite	b [mm]	: 295
Dickenrücklage	x_d [%]	: 35
Streckungsverhältnis	Λ [-]	: 1,969
Abstand zw. Vorderkante und Drehachse	e [m]	: 0,0525

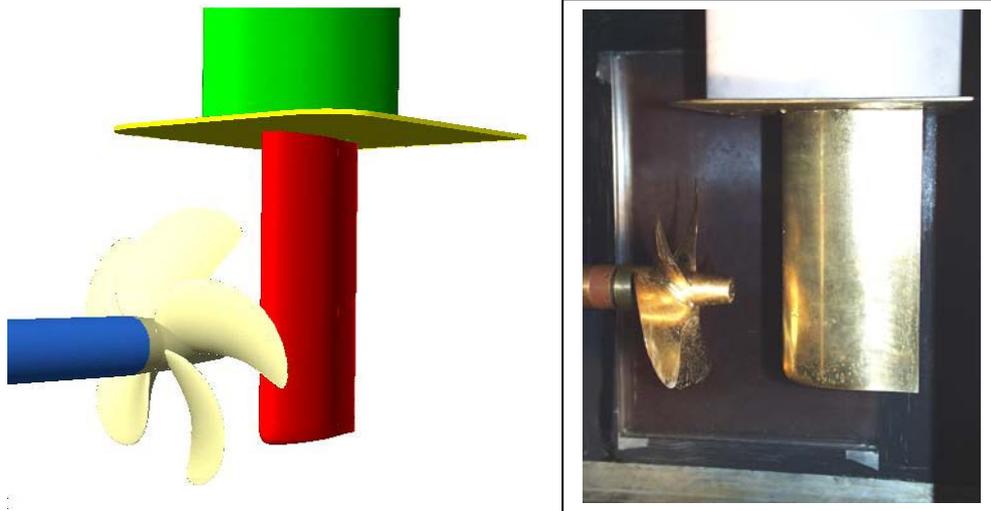


Fig. 4 Propeller-rudder-arrangement for CFD calculations and model tests

3.1 Kennwerte

Der Vergleich der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte der Ruder in homogener Anströmung zeigt, dass durch die Anordnung eines Fish Tails oder eines Flaps die Auftriebsbeiwerte des Ruders deutlich erhöht werden können [Fig. 5]. Aufgrund der Widerstandszunahme des Ruders mit Fish Tail bei allen Ruderwinkeln ist eine höhere Effektivität dieses Rudertyps erst bei Ruderwinkeln von $\delta_R > \pm 10^\circ$ gegeben. Das Ruder mit Flap ist hinsichtlich der Gleitzahl bei kleinen Ruderwinkeln nur geringfügig schlechter als das Ausgangsruder.

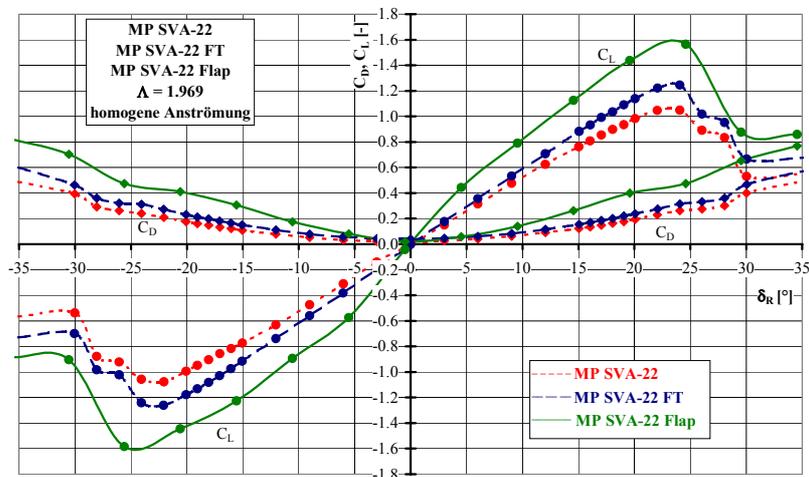


Fig. 5 Drag and lift coefficients, rudders MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, $\Lambda = 1,969$, homogeneous inflow

Die Tabelle 4 zeigt die maximalen Auftriebsbeiwerte und dazugehörigen Ruderwinkel für die drei Ruder mit und ohne Propeller. Der maximale Auftrieb des Ruders mit dem Profil MP SVA-22 wird im Modellversuch durch den Fish Tail um ca. 18% und durch das Flap um ca. 40 - 49% vergrößert.

Tab. 4 Measured maximum lift coefficients, $\Lambda = 1,969$, $R_n = 4,67 \cdot 10^5$

Zuströmung	Ruder	MP SVA-22	MP SVA-22 FT	MP SVA-22 Flap
homogen	C_{Lmax} [-]	1,078	1,261	1,583
	δ_{Rmax} [°]	22,063	22,071	25,592
	ΔC_{Lmax} [%]	100	117	147
inhomogen P 1356 $C_{TH} = 0,85$	C_{Lmax} [-]	-1,113	-1,319	-1,559
	δ_{Rmax} [°]	-30,000	-30,000	-25,500
	ΔC_{Lmax} [%]	100	118	149
inhomogen P 1356 $C_{TH} = 0,85$	C_{Lmax} [-]	1,062	1,193	1,684
	δ_{Rmax} [°]	30,000	30,000	29,500
	ΔC_{Lmax} [%]	100	112	158

Die Kennwerte der Profile MP SVA-22, MP SVA-22 FT und MP SVA-22 Flap wurden für ein Streckungsverhältnis von $\Lambda = \infty$ im Modell- und Großausführungsmaßstab mit dem Verfahren CFX-5 berechnet [Tab. 5 und 6]. Die Veränderungen in den maximalen Auftriebsbeiwerten durch den Fish Tail und das Flap werden im Modellmaßstab in ähnlichen Größenordnungen berechnet, wie in den Versuchen gemessen. Die Berechnungen zeigen aber auch, dass die Reynoldszahleffekte beim Vergleich der Ruderprofile und Rudertypen beachtet werden müssen. Die Reynoldszahl beeinflusst die Umströmung der Profile (Ruder) maßgeblich. Die Vorteile des Ruders mit Flap werden in den CFD-Berechnungen für die Reynoldszahl der Großausführung geringer ausgewiesen als im Modellmaßstab. Hier sind weitere numerische Untersuchungen notwendig.

Tab. 5 Calculated coefficients for the profiles MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, $\Lambda = \infty$, $R_n = 7,5 \cdot 10^5$ (model scale)

Profil Winkel [°]	MP SVA-22			MP SVA-22 FT			MP SVA-22 Flap		
	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]
0	0,015	0,000	-0,630	0,033	0,000	-0,622	0,015	0,000	-0,630
4	0,017	0,437	-1,136	0,034	0,544	-1,231	0,019	0,622	-1,312
8	0,024	0,797	-1,919	0,037	1,087	-2,418	0,031	1,135	-2,532
12	0,042	1,017	-3,152	0,052	1,356	-3,974	0,061	1,386	-4,060
16	0,068	1,179	-4,548	0,089	1,465	-5,364	0,114	1,621	-5,938
20	0,127	1,206	-5,465	0,178	1,442	-6,081	-	-	-

Tab. 6 Calculated coefficients for the profiles MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, $\Lambda = \infty$, $R_n = 3 \cdot 10^7$ (full scale)

Profil Winkel [°]	MP SVA-22			MP SVA-22 FT			MP SVA-22 Flap		
	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]	C_D [-]	C_L [-]	C_{Pmin} [-]
0	0,009	0,003	-0,636	0,033	0,000	-1,010	0,009	0,000	-0,636
4	0,010	0,473	-1,182	0,033	0,510	-1,217	0,011	0,737	-1,453
8	0,015	0,931	-2,151	0,034	1,039	-2,354	0,019	1,369	-3,101
12	0,022	1,337	-4,066	0,036	1,549	-4,730	0,030	1,803	-5,421
16	0,038	1,573	-6,007	0,043	1,968	-7,476	0,059	2,000	-7,612
20	0,063	1,719	-7,895	0,078	1,986	-8,989	-	-	-

Im Modellversuch ergibt sich an der Profelseite in homogener Anströmung eine Verringerung der Kavitationsgefährdung, bezüglich der Blasen- und Schichtkavitation, bei Anwendung eines Fish Tails oder Flaps [Fig. 6]. Beachtet werden muss jedoch die Kavitationsgefährdung am Fish Tail (Kavitation an der Austrittskante) und am Flap (Wirbelkavitation). Das Ruder mit Flap weist auch im Propellerstrahl die geringste Kavitationsgefährdung an der Profelseite hinsichtlich Blasen- und Schichtkavitation auf. Die Ruder MP SVA-22 und MP SVA-22 FT unterscheiden sich bei kleinen Ruderwinkeln nur geringfügig im Einsatz der Blasen- und Schichtkavitation. Bei größeren Ruderwinkeln weist das Ruder mit dem Fish Tail einen späteren Kavitationseinsatz auf [Fig. 7].

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass die Ruderwirkung durch Profile mit Fish Tail und Flap weiter gesteigert werden kann. Auch die Kavitationsgefährdung kann durch diese Profile günstig beeinflusst werden. Die Versuche und Berechnungen erlauben eine quantitative Einschätzung der Veränderung der Ruderkräfte und Kavitationsgefährdung durch Profile mit Fish Tail und Flap.

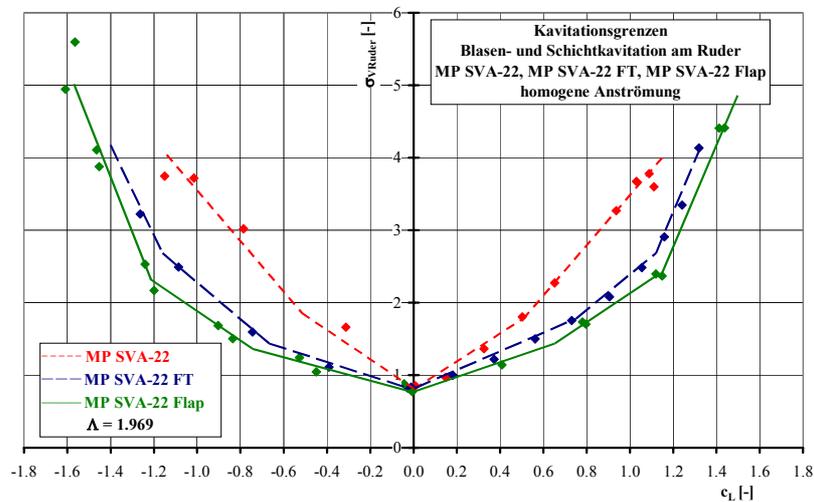


Fig. 6 Cavitation buckets for bubble and sheet cavitation, homogeneous inflow, rudders MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, $\Lambda = 1,969$

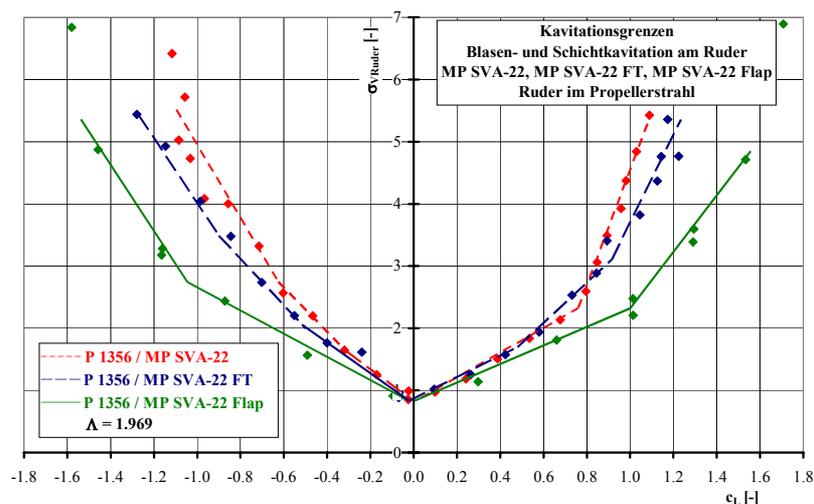


Fig. 7 Cavitation buckets, bubble and sheet cavitation, rudder in the propeller stream, rudders MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, $\Lambda = 1,969$

3.2 Kavitationsberechnungen

Für die Ruder MP SVA-22, MP SVA-22 FT und MP SVA-22 Flap, homogen angeströmt bzw. hinter einem arbeitenden Propeller, wurden für ausgewählte Betriebspunkte (Ruderwinkel, Propellerdrehzahl, Kavitationszahl) Berechnungen der viskosen Strömung mit Modellierung der Kavitation mit dem Verfahren CFX-5 vorgenommen. Zielstellung war die Erfassung der Kavitationserscheinungen am Ruder bei gegebener Kavitationszahl. Das Rechengebiet wurde durch die Abmessungen der Messstrecke des Kavitationstunnels begrenzt. Die modellierte Geometrie berücksichtigt Details des Versuchsaufbaus, wie z.B. die Schaftverkleidung mit Endplatte [Fig. 8]. Berechnet wurde die 2-Phasenströmung mit den Phasen Wasser und Wasserdampf. Das verwendete Kavitationsmodell beruht auf dem Rayleigh Plesset Modell. Die Einstellung der Kavitationszahl erfolgte über eine Absenkung des Druckes im Rechengebiet.

Die Berechnungen für die Ruder in homogener Strömung erfolgten mit ca. 760.000 Knoten. Für die Ruder im Propellerstrahl wurden Rechengitter mit über 925.000 Knoten verwendet. Die Berechnungen mit Propeller erfolgten instationär und winkelaufgelöst. Die CFD-Berechnungen zeigen, dass der Kavitationseinsatz und der Ort der Kavitationsgefährdung mit guter Genauigkeit prognostiziert werden können. Der Charakter der Kavitation und davon abhängig auch die erosive Wirkung der Kavitation kann zur Zeit nur in Ansätzen prognostiziert werden.

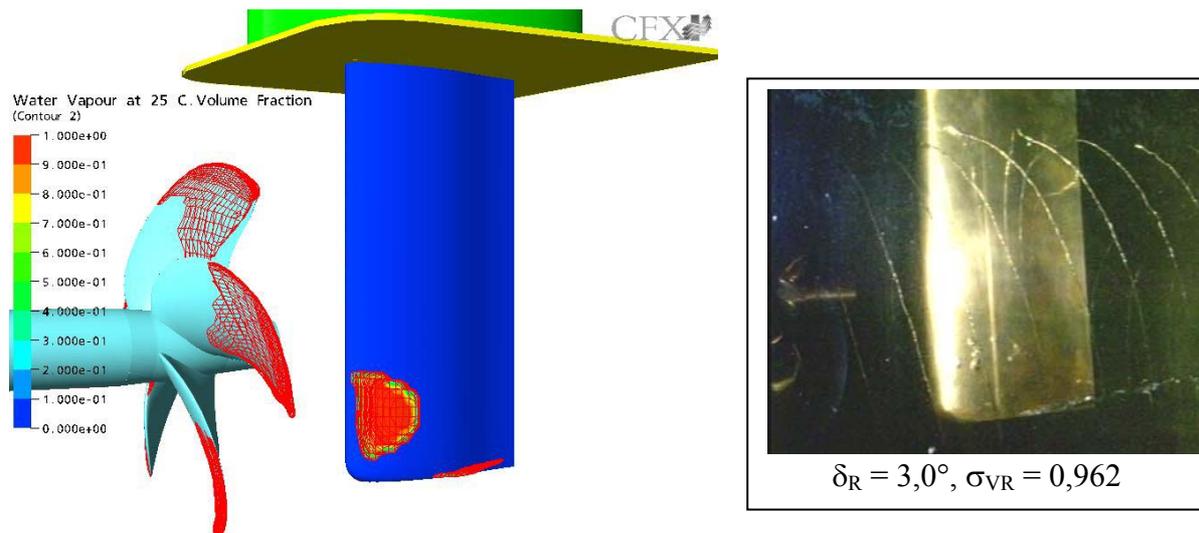


Fig. 8 Cavitation behaviour, rudder MP SVA-22 in the propeller stream, $\delta_R = 3^\circ$, $C_L = 0,073$, $\sigma_{VR} = 1,32$, $R_n = 9,3 \cdot 10^5$

3.3 Reynoldszahleffekte

Die Tabellen 5 und 6 zeigen, dass die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte durch die Reynoldszahl stark beeinflusst werden. Im Bild 9 ist die berechnete Umströmung der Profile MP SVA-22, MP SVA-22 FT und MP SVA-22 Flap beim Anstellwinkel 12° für die Reynoldszahlen $7,5 \cdot 10^5$ und $3 \cdot 10^7$ dargestellt. Im Modellmaßstab ist bei den drei Profilen Ablösung zu verzeichnen. Bei der Reynoldszahl $3 \cdot 10^7$ tritt beim Profil MP SVA-22 keine Ablösung mehr auf, beim Profil MP SVA-22 FT ist hinter dem Fish Tail eine Verwirbelung der Strömung sichtbar. Beim Profil mit dem Flap tritt auch bei der Reynoldszahl $3 \cdot 10^7$ Ablösung auf.

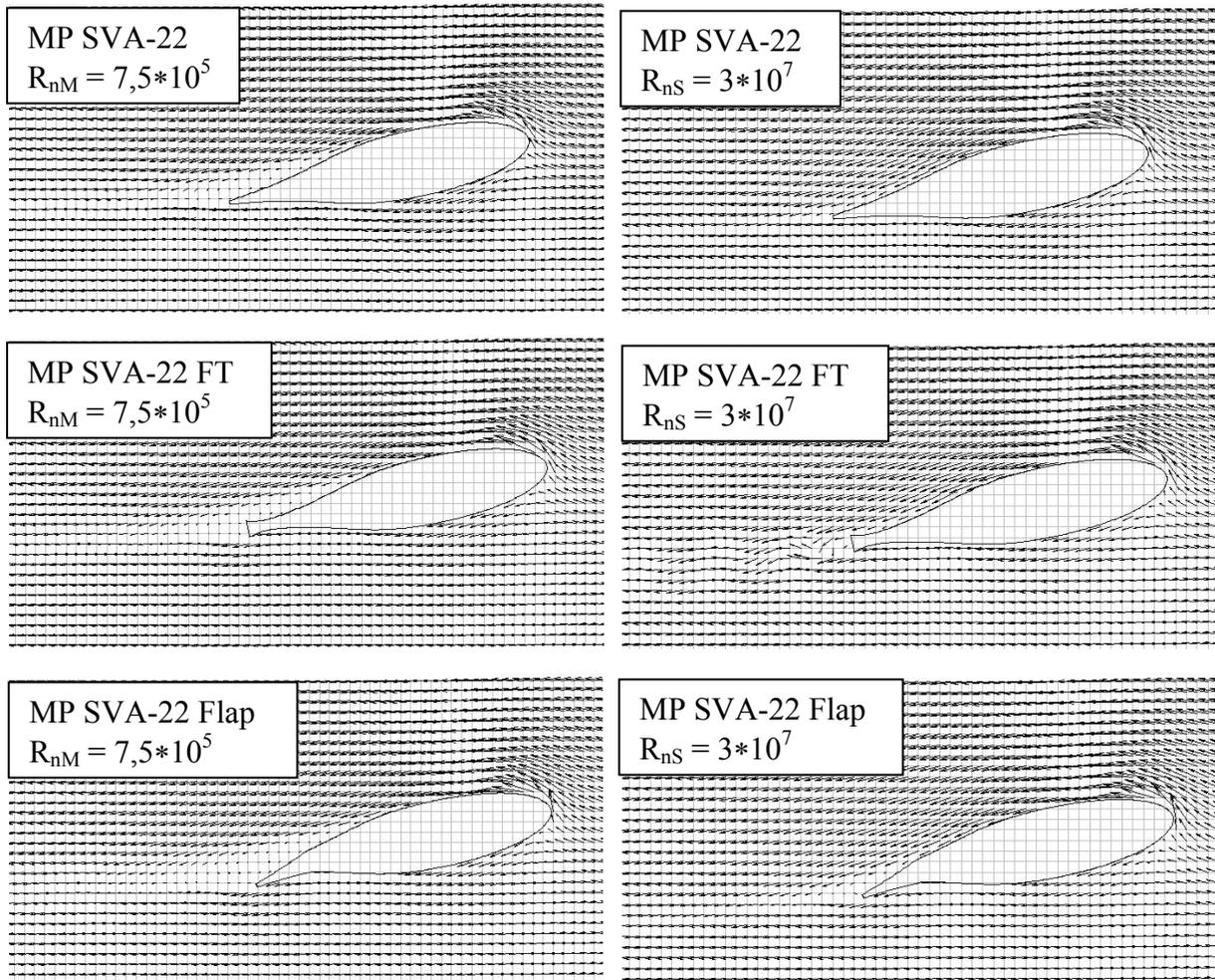


Fig. 9 Velocity vectors for 12°, Profile MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, model and full-scale

Die Tabelle 7 zeigt die Berechnungsergebnisse zum Reynoldszahleinfluss. Es wird deutlich, dass bei den untersuchten Reynoldszahlen der Profilwiderstand um bis zu 50% verringert wird und der Auftrieb sich um bis zu 40% vergrößert. Weitere systematische Berechnungen für Ruder im Propellerstrahl sind notwendig.

Tab. 7 Calculated Reynolds number effects for the profiles MP SVA-22, MP SVA-22 FT, MP SVA-22 Flap, $\Lambda = \infty$, $R_{nM} = 7,5 \cdot 10^5$, $R_{nS} = 3 \cdot 10^7$

Profil Winkel [°]	MP SVA-22		MP SVA-22 FT		MP SVA-22 Flap	
	C_{DS}/C_{DM}	C_{LS}/C_{LM}	C_{DS}/C_{DM}	C_{LS}/C_{LM}	C_{DS}/C_{DM}	C_{LS}/C_{LM}
0,0	0,600		1,000		0,600	
4,0	0,588	1,082	1,000	0,938	0,579	1,185
8,0	0,625	1,168	1,000	0,956	0,613	1,206
12,0	0,524	1,315	0,750	1,142	0,492	1,301
16,0	0,559	1,334	0,472	1,343	0,518	1,236
20,0	0,496	1,425	0,438	1,377	-	-

4. Ruder mit Propulsionsbirne

Das Ruder arbeitet im Propellerstrahl und damit in einer inhomogenen Zuströmung mit veränderlichen Geschwindigkeitskomponenten in axialer und radialer Richtung. Das Ruder beeinflusst das Druckfeld hinter dem Propeller und die Strahlausbildung. Dadurch verändert sich die Belastung eines Propellerblattes in Abhängigkeit vom Umlaufwinkel. Zudem erfolgt eine Verzögerung der axialen und eine Verringerung der tangentialen Strahlgeschwindigkeitskomponenten durch das Ruder. Propeller und Ruder beeinflussen sich gegenseitig in ihren Arbeitsbedingungen. Mit steigender Propellerbelastung nehmen die Wechselwirkungseffekte zu und die Optimierung und Anpassung der Rudergeometrie an die Strömungsverhältnisse gewinnt an Bedeutung.

Die Bilder 10 und 11 zeigen Ergebnisse von CFD-Berechnungen zur Wechselwirkung von homogen angeströmtem Propeller und Ruder. Der fünfflüglige Propeller KP 505 ist der des KRISO-Containerschiffes ($D_S = 7,9$ m, $A_E/A_0 = 0,80$, $P_m/D = 0,95$), *Lübke (2002)*. In Abhängigkeit von der Drehrichtung des Propellers erfolgt eine Auslenkung des Propellerstrahl abwärts auf der einen Seite des Ruders und aufwärts auf der anderen Seite [Fig. 10]. Der Schub des Propellers mit Ruder nimmt um ca. 10% gegenüber dem freifahrenden Propeller zu. Das Drehmoment des Propellers nimmt um ca. 6% zu, so dass eine Wirkungsgraderhöhung des Propellers eintritt. Die tangentialen Geschwindigkeitskomponenten werden durch das Ruder um 33% im Radius $r/R = 0,8$ und um 39% im Radius $r/R = 0,65$ reduziert. Die Schubbelastung des Propellerblattes erhöht sich insbesondere im Umlaufwinkelbereich um 360° und 180° [Fig. 11].

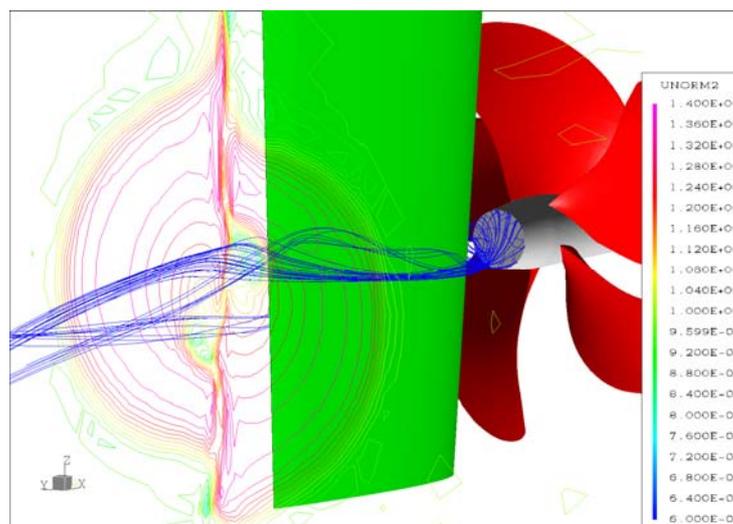


Fig. 10 Flow around a rudder, stream lines in the hub range, velocity distribution behind the rudder

Das Strömungsfeld im Nabenbereich hinter dem Propeller kann durch eine Ruderbirne gezielt verändert werden. Die Ruderbirne soll bewirken, dass ein größerer Anteil der Energie aus dem Drall, besonders des Nabenwirbels, in Vortrieb umgesetzt wird, indem sich der Nabenwirbel nicht so konzentriert aufrollen kann, wie das bei konventionellen Propeller-Ruder-Anordnungen der Fall ist. Die Ruderbirne ist seit mehr als 70 Jahren unter dem Namen Costa-Propulsions-Birne (CPB) im Schiffbau bekannt. Der Nutzen der CPB ist sowohl im Modellversuch als in der Großausführung nachgewiesen worden, wobei Verbesserungen von 4% im Modellmaßstab und von 8% bei der Großausführung erreicht werden konnten.

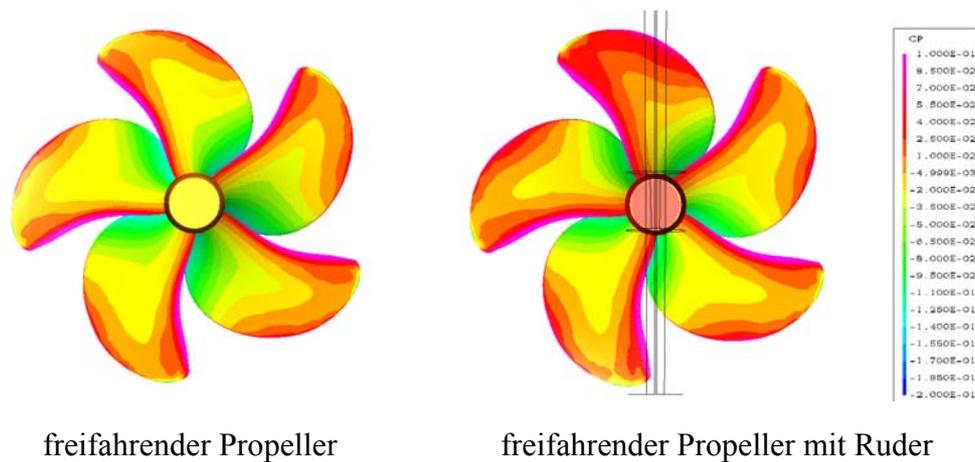


Fig. 11 Influence of the rudder at the pressure distribution (pressure side of the propeller)

Die Auslegung der Ruderbirne erfolgt bis heute mehr oder weniger empirisch. Durch systematische numerische Berechnungen sollten deshalb Hinweise für den Entwurf von Ruderbirnen ermittelt werden. Für die Berechnungen von Propeller mit Ruder wurden drei Ruderbirnen (Costa 1 mit $d_{CPB}/D = 0,275$, $l_{CPB}/D = 0,882$; Costa 2 mit $d_{CPB}/D = 0,241$, $l_{CPB}/D = 0,853$ und Costa 3 mit $d_{CPB}/D = 0,225$, $l_{CPB}/D = 0,659$) ausgewählt [Fig. 12]. Wie üblich wurde der Durchmesser der CPB etwas größer gewählt als der Nabendurchmesser des Propellers ($d_N/D = 0,180$), damit durch die größere Strahlaufweitung mehr kinetische Energie über den Druck auf der Ruderbirne in Schub umgewandelt wird. Der CPB-Durchmesser kann nicht beliebig vergrößert werden, da er in radialer Richtung aus dem Nabennachlauf heraus in den Propellerstrahl hineinragt und mit wesentlich höherer Axialgeschwindigkeit beaufschlagt wird, was zu einer Widerstandserhöhung führen würde.

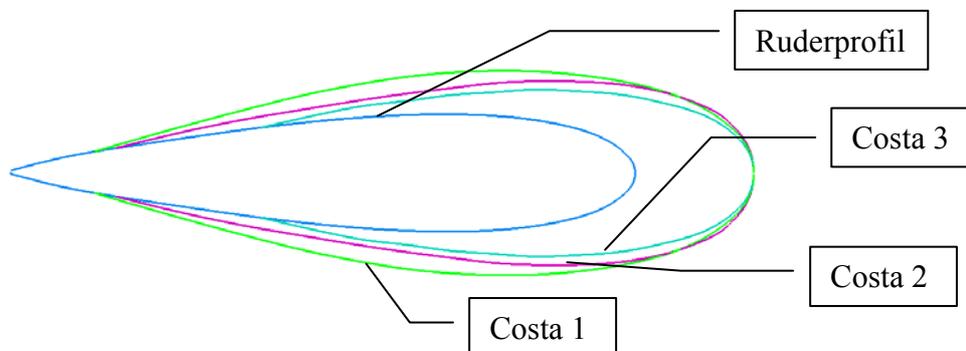


Fig. 12 Rudder profile with bulbs

Die Berechnungen der Umströmung des Ruders mit und ohne CPB im Propellerstrahl [Fig. 13] wurde im Modell- und Großausführungsmaßstab durchgeführt. Die Reynoldszahl beeinflusst die axiale Umströmung des CPB deutlich, während die tangentialen Geschwindigkeitskomponente relativ unabhängig von der Reynoldszahl ist. Die unterschiedlichen CPB-Varianten beeinflussen die radiale Verteilung der Abströmung, die Mittelwerte der axialen und tangentialen Geschwindigkeiten ändern sich jedoch nur geringfügig. Die Tabelle 8 zeigt die Änderung des Gesamtschubes (Propellerschub plus Ruderwiderstand) und des Drehmomentes für die untersuchten CPB-Varianten bezogen auf das System Propeller mit Ruder ohne CPB.

Tab. 8 Coefficients of the propeller with rudder with different CPB-variants

	Ruder	Ruder mit CPB Costa 1	Ruder mit CPB Costa 2	Ruder mit CPB Costa 3
K_{TGmCPB}/K_{TG0CPB}	1,0	1,032	1,020	1,020
K_{QmCPB}/K_{Q0CPB}	1,0	1,029	1,015	1,015
η_{mCPB}/η_{0CPB}	1,0	1,002	1,006	1,006

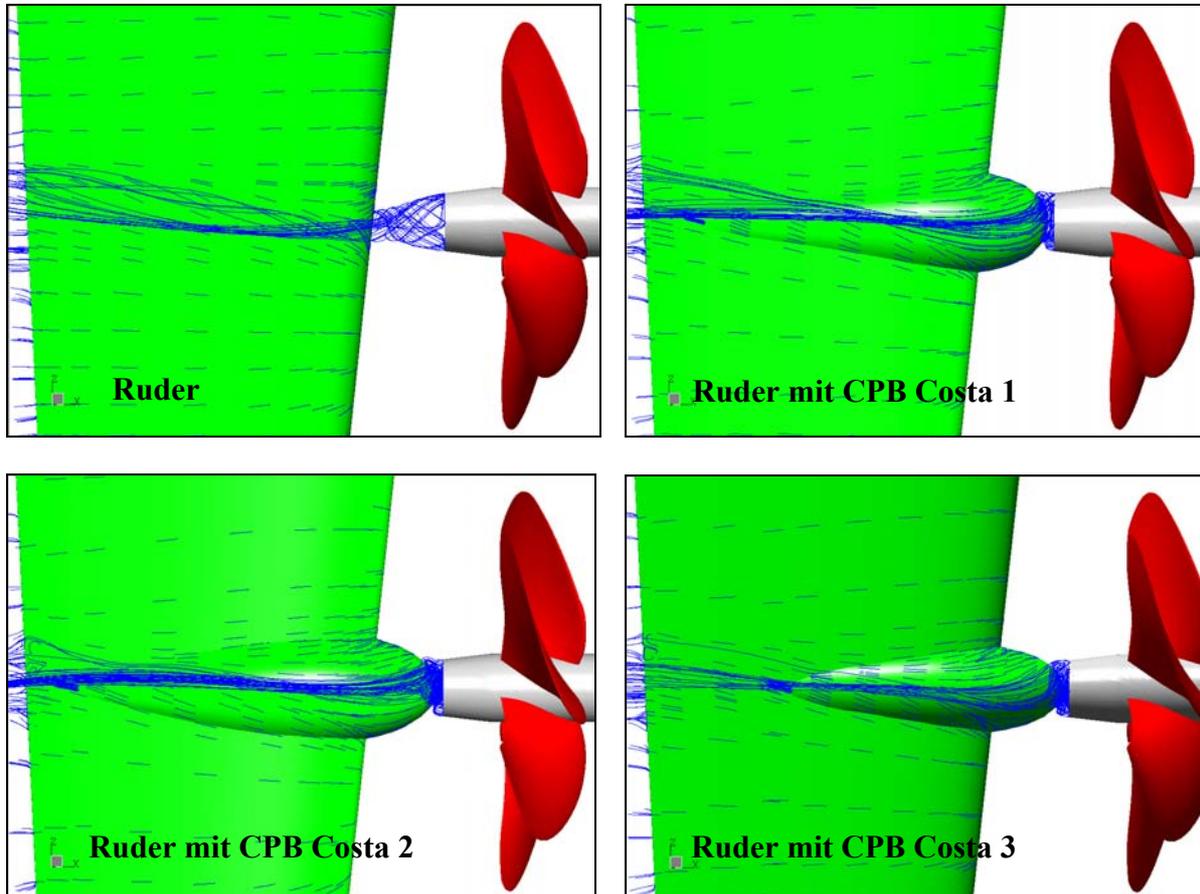


Fig. 13 Velocity vectors at the rudder, calculated for full-scale

In einem weiteren Schritt wurden CFD-Berechnungen und Modellversuche zur Untersuchung des Effektes von CPB an unterschiedlichen Schiffstypen durchgeführt, *Grabert (2005)*. Für die Untersuchungen wurden je ein schlanker Ein- und Zweischauber ($C_B = 0,5629$ und $0,5678$) sowie ein völliger Einschrauber ($C_B = 0,8560$) ausgewählt. Die Berechnungen und Messungen umfassten jeweils das Schiff mit dem originalen Ruder, mit 3 Varianten des CPB-Ruders und 3 verschiedene Positionen des Ruders in x-Richtung für ein ausgewähltes CPB-Ruder.

Beim völligen Einschrauber (hoher Schubbelastungsgrad) wurden Propulsionsverbesserungen im Bereich von 4% im Modellversuch und in der CFD-Berechnung nachgewiesen. Beim schlanken Einschrauber und beim Zweischauber sind die Änderungen im Leistungsbedarf mit und ohne CPB minimal [Fig. 14].

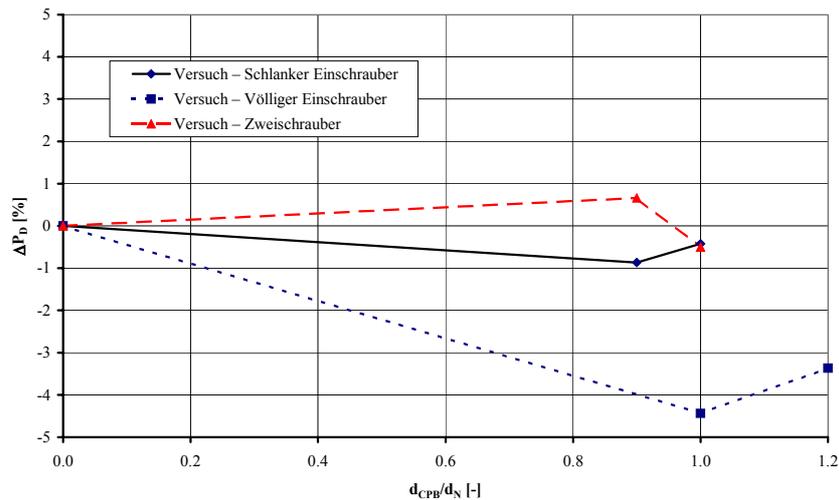


Fig. 14 Influence of the CPB diameter at the delivered power

Die systematischen Berechnungen und Versuche zeigten die allgemeine Tendenz von größeren Leistungseinsparungen bei kleineren Abständen zwischen CPB und Ablaufkappe des Propellers. Im Bild 15 sind Versuchsergebnisse für die Dienstgeschwindigkeiten der drei Schiffe (28 kn für die beiden schlanken Schiffe und 12 kn für das völlige Schiff) dargestellt.

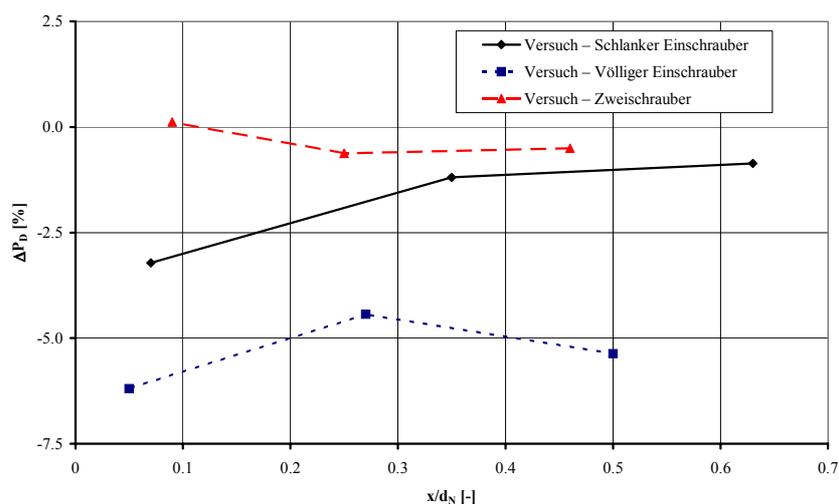


Fig. 15 Influence of the distance between CPB and propeller hub at the delivered power

Mit den einzelnen Modellen wurden Ruderkraftmessungen unter Propulsionsbedingungen, jeweils für die Dienstgeschwindigkeit durchgeführt. Dabei wurde die im Propulsionsversuch ermittelte Propellerdrehzahl eingestellt. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- Es gibt eine Tendenz zu niedrigeren maximalen Auftriebsbeiwerten durch die CPB.
- Die Widerstandsbeiwerte der Ruder mit CPB sind teilweise größer als die der konventionellen Ruder, teilweise gleich groß.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass CFD-Methoden zunehmend für die Auslegung von Ruderbirnen geeignet sind. In dem Vorhaben hat sich herausgestellt, dass die Simulation der Propellerwirkung mittels Senkscheibe für diesen Zweck unzureichend ist. Durch die Berücksichtigung der vollständigen Propellergeometrie konnten bessere Ergebnisse

erzielt werden, aber trotz des weitaus größeren Rechenaufwandes sind diese immer noch nicht zufriedenstellend. Erst die vollständige instationäre Betrachtung von Schiff mit arbeitendem Propeller unter Berücksichtigung des Wellensystems an der Wasseroberfläche verbunden mit notwendigen Verbesserungen an Algorithmen in der numerischen Simulation (Software) verspricht genauere Aussagen zu den Kräften, die zur Bewertung und Auslegung des Propulsionssystems benötigt werden.

5. Aktivrudder mit Elektromotor

Als Aktivrudder werden Ruder mit einem integrierten Propeller bezeichnet. Durch den Einsatz von Aktivrudern kann insbesondere die Steuerfähigkeit des Schiffes bei kleinen Geschwindigkeiten verbessert werden. Der Schub des Propellers am Ruder erhöht die Propulsionsgüte, gestattet Manövrieren und Fahrt bei kleinen Geschwindigkeiten mit abgeschaltetem Hauptantrieb. Der Propeller kann heute mit einem leistungsfähigen Elektromotor, der in einer Ruderbirne (CPB) am Ruder integriert wird, angetrieben werden.

Wie Erfahrungen des Betriebes von Schiffen mit Aktivrudder zeigen, kann ein Schiff mit Aktivrudder beim Manövrieren im Hafen ohne Schlepper auskommen. Die Propulsionsgüte eines Schiffes mit Aktivrudder kann durch die Aufteilung der Leistung auf zwei Propeller und die Verminderung der Drallverluste durch die kontrarotierenden Propeller erhöht werden. Ein positiver Einfluss auf die Propulsionseigenschaften wird auch durch die Gondel für den Elektromotor erzielt.

Durch IBMV Rostock und AIR Hohen Luckow wurden im Rahmen eines InnoRegio-Projektes umfangreiche Berechnungen zur Bestimmung von Motor- und Propellerparametern für Aktivrudder durchgeführt. Die Zuströmung zum Aktivrudderpropeller wurde durch CFD-Berechnungen und Messungen der Geschwindigkeiten im Propellerstrahl hinter dem Ruder für unterschiedliche Betriebsbedingungen ermittelt, *Heinke et. al (2004b)*. Die Zuströmung zum Aktivrudderpropeller ist sehr inhomogen [Fig. 16]. Der Aktivrudderpropeller muss für das Zusammenwirken mit dem Hauptpropeller ausgelegt werden. Unter dem Gesichtspunkt der Arbeit als Zusatzantrieb bei voller Fahrt ist ein freier Propeller sinnvoll. Ein Düsenpropeller am Aktivrudder ist bei der Redundanzgeschwindigkeit (V_S ca. 7 kn) und bei Pfahlzug ($V_S = 0$ kn) von Vorteil. Die Analysen führten zur Auswahl eines flexiblen CFK-Propellers in einer Düse. Über die flexiblen Flügel des Propellers wird eine begrenzte Anpassung der Propellergeometrie an die unterschiedlichen Betriebsbedingungen erreicht.

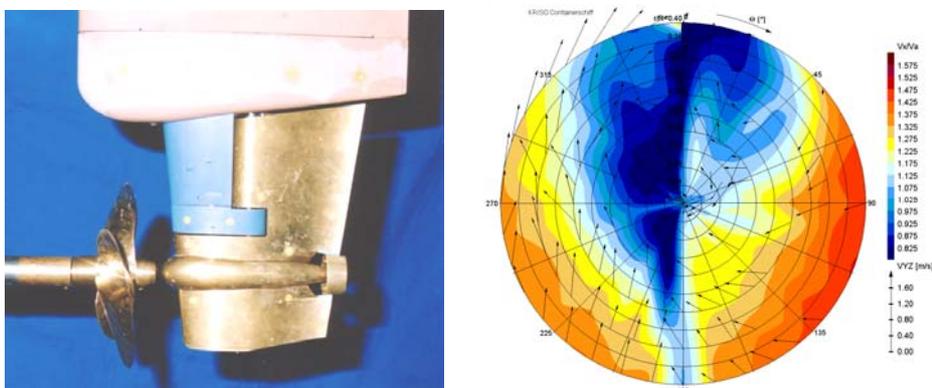


Fig. 16 Velocity field behind the rudder in the range of the active rudder propeller (reference velocity $V_A = 4,818$ m/s, radii with reference to the main propeller)

Im Bild 17 sind die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte des Aktivruders mit arbeitendem Düsenpropeller dargestellt. Negative Widerstandsbeiwerte bedeuten einen Schub in Fahrtrichtung (x-Richtung). Der Schub des Aktivruders nimmt mit der Erhöhung der Schiffsgeschwindigkeit ab. Das gleiche gilt auch für die Auftriebsbeiwerte (Schub in Querrichtung).

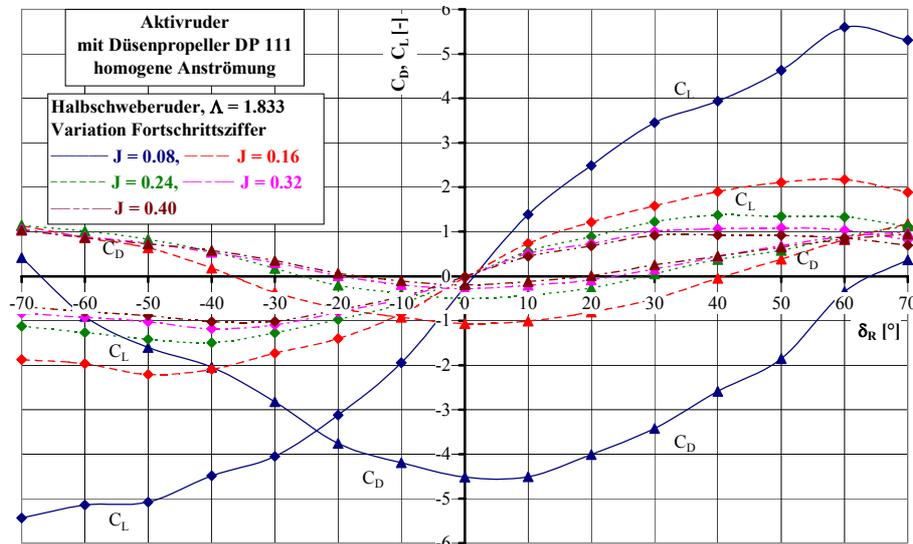


Fig. 17 Coefficients of the active rudder with ducted propeller DP 111, variation of advance coefficient

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit für die Förderung von Forschungsprojekten zur Ruderoptimierung in den letzten Jahren. Besonderer Dank gilt Dr. Wagner, Dr. Kracht und Prof. Dudzus für die Anregungen und die kritische Begleitung der FuE-Vorhaben sowie den Firmen, die durch ingenieurtechnische Zuarbeiten und praxisbezogene Analysen die Bearbeitung der Vorhaben unterstützten.

Referenzen

- KRACHT, A. (1987), *Kavitation an Rudern*, Jahrbuch der STG 81
- KRACHT, A. (1992), *On Propeller-Rudder Interaction*, International Symposium on Propulsors and Cavitation, Hamburg
- HEINKE, H.-J.; RIECK, K.; LAMPRECHT, M.; JAKSIC, D. (2004a), *Profile für Hochleistungsrunder*, Bericht Nr. 3046, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Dez. 2004
- LÜBKE, L. O. (2002), *Numerical Investigations of the Viscous Flow around Costa Bulbs*, NUTTS 2002
- GRABERT, R. (2005), *CFD als Mittel zur Auslegung von Ruderbirnen*, Bericht Nr. 3120, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Juni 2005
- HEINKE, C.; HEINKE, H.-J.; JAKSIC, D.; SCHMIDT, D. (2004b) *Propulsionssystem mit Hochleistungs-Aktivrunder*, Bericht Nr. 3051, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Dez. 2004

Tab. 9 Profile data

Profil	MP 71-20	MP 73-20	MP SVA-22	MP SVA-22 FT	MP SVA-22 Flap
x	y	y	y	y	y
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0030			0,1301	0,1301	0,1301
0,0050	0,1537	0,2021			
0,0125	0,2310	0,3157	0,2563	0,2563	0,2563
0,0250	0,3060	0,4358	0,3617	0,3617	0,3617
0,0500	0,4190	0,5924	0,5094	0,5094	0,5094
0,0750	0,5080	0,7000			
0,1000	0,5840	0,7804	0,6969	0,6969	0,6969
0,1500	0,7063	0,8909	0,8159	0,8159	0,8159
0,2000	0,8003	0,9562	0,8963	0,8963	0,8963
0,2500	0,8727	0,9902	0,9502	0,9502	0,9502
0,3000	0,9273	1,0000	0,9838	0,9838	0,9838
0,3500	0,9663		1,0000	1,0000	1,0000
0,4000	0,9903	0,9600	0,9997	0,9997	0,9997
0,4500	1,0000		0,9827	0,9827	0,9827
0,5000	0,9644	0,8300	0,9468	0,9468	0,9468
0,5500	0,8889		0,8864	0,8864	0,8864
0,6000	0,7911	0,6394	0,7997	0,7997	0,7997
0,6500	0,6744		0,6902	0,6902	0,6902
0,7000	0,5511	0,4500	0,5682	0,5682	0,5682
0,7500	0,4278		0,4490	0,4490	0,4490
0,8000	0,3144	0,2740	0,3422	0,3422	0,3422
0,8500	0,2167		0,2510	0,2510	0,2510
0,9000	0,1411	0,1200	0,1748	0,1826	0,1748
0,9500	0,0856	0,0744	0,1108	0,1616	0,1108
0,9800				0,1944	
0,9900				0,2173	
1,0000	0,0544	0,0540	0,0539	0,2465	0,0539