

Das Propeller- Entwurfs- und Optimierungskonzept der SVA

Dr. habil. **Reinhard Schulze**

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, Potsdam

1 Einleitung

Diese Arbeit beschreibt die bei der SVA vorliegenden Softwaretools zur hydrodynamischen und mechanischen Analyse (Nachrechenverfahren) von Schiffspropellern und eine Propellerentwurfsstrategie auf der Basis von inversen Methoden. Die vorhandenen Nachrechenverfahren entsprechen dem Stand der Technik und werden ständig vervollkommenet.

Im Unterschied zu den Propellerentwurfsmethoden, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen und im wesentlichen auf einer trial and error Strategie aufbauen, orientiert die SVA direkt auf die Anwendung inverser Methoden. Während bei der trial and error Strategie eine erfahrungsbasierte Formvariation vorgenommen wird und an Hand verschiedener Nachrechenverfahren das Entwurfsergebnis beurteilt wird, bemühen wir uns um eine zielgerichtete Formvariation mittels eines Gütekriteriums an Hand eines Optimierungsverfahrens, wobei zur Ermittlung des Gütekriteriums wieder Nachrechenverfahren herangezogen werden müssen [8,11]. Lassen sich mit den Nachrechenverfahren unkonventionelle Propeller hinreichend genau behandeln, so lassen sie sich auch mit den inversen Strategien optimal entwerfen.

Folglich ruht das Propeller-Entwurfskonzept auf zwei wesentlichen Säulen:

1. Dem "Numerischen Tank Propulsion der SVA" als Bündel von Softwaretools im Sinne von Nachrechenverfahren
2. Softwaretools zur Realisierung von inversen Methoden im Sinne von Optimierungsstrategien.

2 Der Numerische Tank Propulsion der SVA

Der Ingenieur sieht sich bei der Bewertung eines Propellers unter anderem mit folgenden Fragestellungen konfrontiert:

- Zusammenwirken von Schiff, Propeller und Hauptmaschine
- Auslegung der Hauptabmessungen nach Serienpropellerversuchen
- Abschätzen einer Geometrie mit Vergleichspropellern

- Hydrodynamische Analyse einer Propellergeometrie
- Propellerfestigkeit nach Klassifikationsvorschriften
- Propellerfestigkeit mit Finite-Element-Methode
- Berücksichtigung des Kavitationsverhaltens
- Profilauswahl

Bei der routinemäßigen Anwendung unterschiedlicher Entwurfs- und Nachrechenverfahren ergeben sich dann oft Unzulänglichkeiten:

- unterschiedliche Bezeichnungen, Maßeinheiten, Koordinatensysteme
- mangelnde Benutzerführung, fehlende Dateneingangskontrollen
- Diskrepanzen zwischen Programmversionen und Dokumentationen
- unterschiedliche Ergebnisaufbereitung und Präsentation
- verschiedene Hardwareplattformen, usw.

Aus diesen Gründen entstand im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierte Propulsionssysteme für See- und Binnenschiffe" das Softwarepaket PROPHET (Propeller Package of Hand-picked Engineering Tools). PROPHET vereint verschiedene Entwurfs- und Nachrechenverfahren der Wismarer Propeller- und Maschinenbau GmbH, der Universität Rostock und der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

- für Fest- und Verstellpropeller mit und ohne Ummantelungen,
- mit konventionellen und unkonventionellen Flügelformen,
- auf der Basis von empirischen und statistischen Verfahren, Kurzverfahren, Traglinientheorie und Flächentheorie unter einer gemeinsamen Benutzeroberfläche.

Das Programmpaket PROPHET ist ausschließlich unter DOS lauffähig und unterliegt damit auch den DOS-Beschränkungen für die Ressourcen. In PROPHET integriert sind keine Programme zur Festigkeitsrechnung und zur Beurteilung der Kavitationseigenschaften und induzierten Druckschwankungen.

Als effektivste Nachrechenverfahren für die Propellerumströmung haben sich international Flächentheorieverfahren durchgesetzt. Folgerichtig wurden auch diese Verfahren von der SVA weiterentwickelt und das unter OS/2 auf PC's und Workstations lauffähige Programmsystem VORTEX konzipiert.

VORTEX enthält Schnittstellen zur Berechnung von Kavitationserscheinungen und zur Festigkeitsanalyse mittels Finite-Element-Methoden, sowie Optimierungstools. Mit VORTEX lassen sich auch unkonventionelle Propellergeometrien behandeln (TIP-FIN-, CLT-Propeller). Für die Festigkeitsanalyse mittels Finiter-Element-Methoden wird das kommerzielle Programm ANSYS genutzt. Dazu wurde die Koppelroutine PFEST [10] geschaffen. Für eine einheitliche Beschreibung der Propellergeometrie wurde ein eigenes (ASCII-) file-format PFF (Propeller-File-Format) entwickelt [7], das blockstrukturiert und transparent verschiedene Propellerstrukturen (Blatt-

geometrie, Nabe, Düse) als Eingabe, Steuerdatenblöcke und Berechnungsergebnisse enthalten kann. Unter Verwendung des kommerziellen Programmes AUTOCAD läßt sich aus einem PFF-file direkt eine Propellerzeichnung gewinnen. Das Programmpaket VORTEX/PFEST wurde von der SVA Potsdam als Lizenz an den Germanischen Lloyd Hamburg für Festigkeitsberechnungen an Schiffspropellern vergeben. Der PFF-file Editor PFFEDIT wurde inzwischen an mehrere internationale Propellerhersteller weitergegeben und kann kostenlos von der SVA-Potsdam GmbH bezogen werden.

☺ ---> PFFEDIT ---> name.pff
 name.pff ---> VORTEX ---> name.p10
 (Flächentheorieverfahren) name.erg
 (falls mit Optimierungszylus: nameOpt.pff ☺)


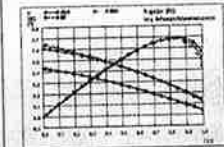
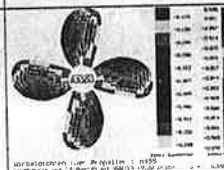
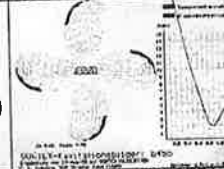


---> AUTOCAD (name.pff)	kommerzielles Programm fertigt Propellerzeichnung	
---> PROPKURV (name.p10)	grafische Darstellung der integralen Größen K_T , $10K_Q$ und η_0	
---> PROPLOT (name.erg)	grafische Darstellung der Wirbeldichtenverteilung auf der Propelleroberfläche	
---> KAVIROT (name.erg)	grafische Darstellung der Kavitationsgrenzkurve und der Kavitationserscheinungen im Nachstromfeld (quasistationär)	
---> VPLOTT (name.erg)	Berechnung und Darstellung der Geschwindigkeitsverhältnisse in der Propellerumgebung, insbesondere im Strahl	
---> PFEST/ ANSYS: (name.erg)	Übernahme der Kräfteverteilung von VORTEX und FEM-Festigkeitsrechnung mit kommerziellem Programm ANSYS	

Abb. 1. Numerischer Tank Propulsion der SVA

Für insgesamt über 100 Propeller steht uns eine Datenbank von PFF-files zur Verfügung, die jederzeit für Nachrechnungen herangezogen werden kann. Viele der dort erfaßten Propeller wurden in der SVA als Modell gefertigt, und es liegen entsprechende Messungen im Kavitationstank und in der Schlepprinne vor. Die Resultate der Berechnungen (Freifahrtdiagramme und Kavitationserscheinungen) für 29 ausgewählte Propeller einschließlich solcher mit unkonventioneller Flügelform wurden in [9] zusammengestellt. Eine Beschreibung der Anbindung an ANSYS zur Festigkeitsrechnung findet sich in [10].

3 Strategien für den Entwurf optimaler Propellergeometrien auf der Basis inverser Methoden

Die zum Einsatz kommenden Nachrechenverfahren unterscheiden sich stark nach Gültigkeitsbereich, Rechengeschwindigkeit und Genauigkeit. So bleiben z.B. die statistischen Verfahren auf der Basis der Wageninger Polynomkoeffizienten im wesentlichen auf die Wageninger Serie beschränkt, haben aber eine große Genauigkeit, da sie unmittelbar auf der Auswertung von Meßergebnissen aufbauen, und die Rechenzeiten

sind minimal. Hinsichtlich Gültigkeitsbereich und Genauigkeit haben die Flächentheorieverfahren große Vorteile, sind aber relativ langsam.

Die heute auf dem Stand der Technik aufbauenden Entwurfsstrategien sind dialogorientierte iterative Konzepte auf der Basis von trial and error, wobei meist eine subjektive Bewertung der Ergebnisse von verschiedenen Nachrechenverfahren mit dem Ziel der erfahrungsgestützten manuellen Formvariation erfolgt.

Die SVA stellte sich die Aufgabe, im Rahmen einer sog. "Toolbox Propulsionsoptimierung" sowohl die Bewertung der Ergebnisse der Nachrechenverfahren als auch die Formvariation des Propellers mit mathematischen Hilfsmitteln anzugehen. Der Entwurfsprozeß soll an Hand der folgenden Diagramme veranschaulicht werden:

Inverse Aufgabenstellungen bzw. Methoden umfassen Probleme die sich numerisch durch Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme sowie durch Lösung von Optimierungsproblemen behandeln lassen. Dabei wäre zu beachten, daß sich Gleichungssysteme auch als Optimierungsprobleme formulieren lassen. Charakterisch für eine Optimierungsaufgabe ist die Existenz eines Gütekriteriums (-functionals) das für alle möglichen Variablen (hier Geometrieparameter) eine eindeutige Bewertung durch eine Zahl ermöglicht. Das gemeinsame bei inversen Aufgabenstellungen ist, daß sich die gesuchten Größen i.a. nicht mehr explizit

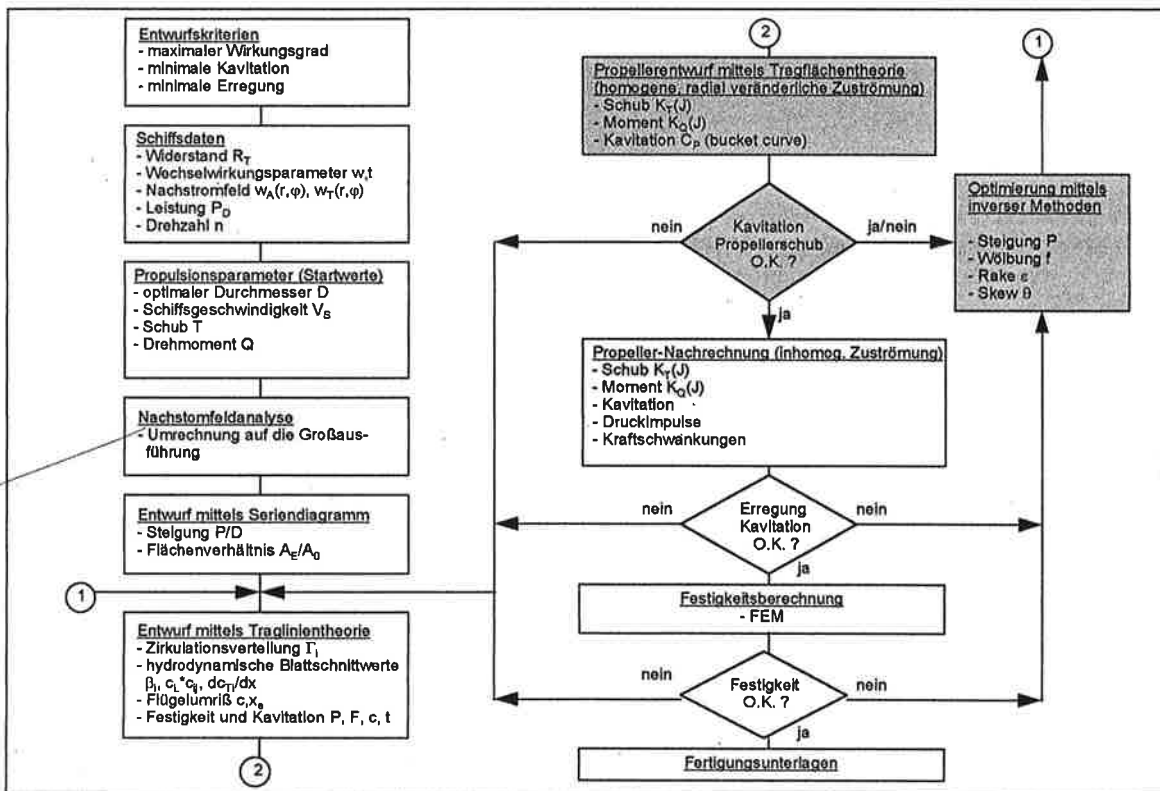


Abb. 2. Ablaufplan für den Propellerentwurf

Entwurf von Festpropellern mittels inverser Methoden

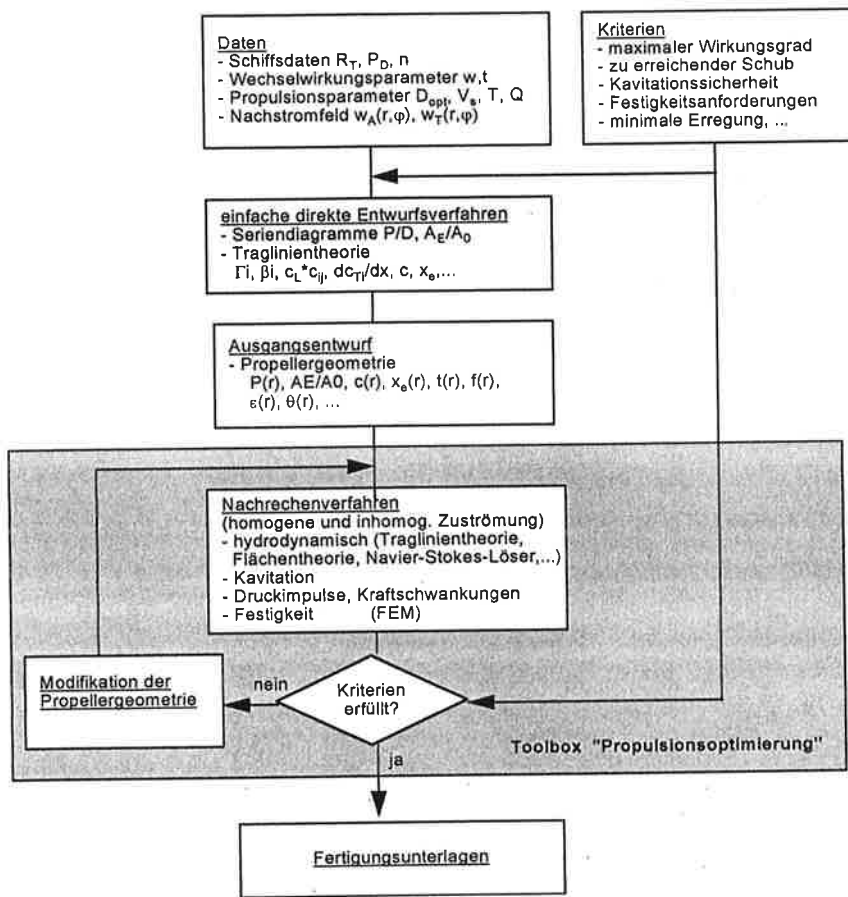


Abb. 3. Toolbox "Propulsionsoptimierung"

ausrechnen lassen, sondern indirekt über andere ableitbare Größen berechnet werden müssen. Orientiert man sich an Gleichungssystemen, die die gesuchten Größen miteinander verkoppeln, benötigt man i.a. so viele Gleichungen wie Unbekannte gesucht sind. Auf unserer Problematik zugeschnitten, ergäben sich dann Verfahren, die z.B. aus einer vorgegebenen Druckverteilung die Propellergeometrie ermitteln. Woher aber z.B. die Druckverteilung nehmen, wenn ein wirkungsgradmaximaler Propeller gesucht wird. Andererseits kann man mit geeigneten Nachrechenverfahren (z.B. Wirbelgitterverfahren) den Propellerwirkungsgrad für einen bestimmten Betriebspunkt hinreichend genau bei gegebener Propellergeometrie ermitteln. Definiert man nun unser Gütefunktional z.B. durch den Wirkungsgrad des Propellers, hat man jeder Geometrie (bzw. allen Formparametern, die die Propellergeometrie beschreiben) eine Zahl zugeordnet. Bei "hinreichender Gutartigkeit" dieses Funktionals kann man dann mit geeigneten Techniken zur Lösung von Optimierungsproblemen den (bzw. die) in unserem Sinne "besten"

(optimalen) Propeller entwerfen. Auch Beschränkungen ganz unterschiedlicher Art, die man beim Entwurf beachten muß, lassen sich in das Optimierungskonzept mit einbauen. Sie können in Form von Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen vorliegen. Es existieren sehr leistungsfähige theoretische und praktische Werkzeuge zur Behandlung von Optimierungsproblemen. Aus theoretischer Sicht stehen Existenz- und Lokalisierungs-(Eindeutigkeits-)aussagen im Vordergrund. Aus praktischer Sicht interessieren Aufwands- und Genauigkeitsaussagen. Die verwendeten Nachrechenverfahren stützen sich im allgemeinen auf eine Geometriebeschreibung des Propellers in diskretisierter Form, wie z.B. den folgenden Daten: (D), c, Φ , rake, X_e , f/c und t/c als Funktion von r/R und Profilinformatoren definieren die Propellergeometrie G (G wird hier durch 36 reelle Zahlen beschrieben). Je nach eingesetztem Nachrechenverfahren werden die integralen Größen K_T , K_Q , als Funktion von G (und J) über verschiedene Zwischenschritte berechnet.

r/R	c	phi	rake	Xe	f/c	t/c
.200	479.710	53.528	.000	295.410	.038565	.118488
.400	587.560	34.075	.000	352.510	.027401	.074341
.600	641.930	24.272	.000	358.320	.020251	.047544
.700	636.720	21.132	.000	335.210	.017119	.037599
.900	486.390	16.732	.000	194.560	.011102	.022163
1.000	20.000	15.140	.000	.000	.000000	.000000

Eine direkte Berechnung von G aus K_r, K_Q (bzw. η) ist nicht möglich (es wären viele Unbekannte aus zwei Größen zu ermitteln). Demgegenüber ist z.B. im Zweidimensionalen eine direkte Berechnung der Profilgeometrie aus einer vorgegebenen Druckverteilung möglich.

Wir veranschaulichen unser Vorgehen an folgender Problemstellung:

Für den Entwurfsunkt (J^*, K_Q^*) soll ein wirkungsgradmaximaler Propeller gesucht werden. Als variable Größen seien nur die Steigungs- und Wölbungsverteilung bei sonst vorgegebenem Blattumriß gesucht.

Wir definieren das Funktional

$$f(\Phi, f/c) = (1 - \eta(\Phi, f/c))^2 + \alpha (K_Q(\Phi, f/c) - K_Q^*)^2$$

und formulieren unser Optimierungsproblem in Form einer Minimierungsaufgabe

$$f(\Phi, f/c): \implies \text{Min} !$$

Für hinreichend großes α ("Strafparameter", [13]) erhalten wir näherungsweise $K_Q(\Phi, f/c) = K_Q^*$ und existiert eine Lösung, so ist sie die wirkungsgradmaximale.

Die Formulierung als Minimumproblem eröffnet die Möglichkeit der Anwendung von vielfach erprobten Optimierungsstrategien. Nichtlineare (freie) Optimierungsprobleme werden stets iterativ gelöst. Im Mittelpunkt steht dabei die Funktionalberechnung, die hier stets die Anwendung eines (zeitaufwendigen) Nachrechenverfahrens bedeutet. Die allgemein verwendeten Algorithmen zur Optimierung lassen sich auch gut parallelisieren.

Bei den iterativen Verfahren geht man i. a. [12] von dem Ansatz

$$x_{k+1} = x_k + a_k p_k \text{ aus.}$$

Beim Newtonverfahren wählt man $a_k = 1$ und $p_k = -H^{-1}(f(x_k)) \text{ grad} f(x_k)$, wobei H die Hessematrix (Jacobimatrix von $\text{grad} f$) bezeichnet.

Beim Verfahren des steilsten Abstiegs wählt man $p_k = -\text{grad} f(x_k)$ und a_k

$$\text{so daß } f(x_{k+1}) = \min f(x_k + a p_k) \\ a > 0$$

(Für unser Beispiel wäre $x = (\Phi, f/c)$ zu setzen.)

Alle Verfahren benötigen einen Zeitaufwand proportional zu n^3 . Daher muß man sich bei den zeitaufwen-

digen Verfahren auf wenige Parameter (< 20) beschränken. Folglich scheint ein polynomialer Ansatz auch aus analytischer Sicht für die Unbekannten $c, \Phi, \text{rake}, X_e, f/c, t/c$ als Funktion vom Radius sinnvoll. Als erzeugende Funktionen kämen orthogonale Polynome und trigonometrische Polynome in Frage.

Der erste Schritt zur Erprobung dieser Optimierungsstrategien, wurde unter Verwendung eines Nachrechenverfahrens auf der Basis der Wageninger Polynomkoeffizienten getan und in dem Programm WAGENOPT realisiert.

Unter Verwendung des Burrill-Diagramms als "Nebenbedingungssystem" werden von diesem Programm das Flächenverhältnis, der Durchmesser und die Steigung für einen Wageninger Propeller mit bestmöglichem Wirkungsgrad im Entwurfsunkt ermittelt.

Unter Verwendung eines in VORTEX implementierten Flächentheorieverfahrens wurde diese Optimierungsstrategie auch in VORTEX selbst integriert. Damit lassen sich im Gültigkeitsbereich der Flächentheorieverfahren auch für unkonventionelle Propeller die Propellergeometrien optimieren. In VORTEX wurde ein auf Davidon/Fletcher/Powell [12] zurückgehendes Verfahren zur Minimierung eines Funktionals eingesetzt.

In VORTEX stehen verschiedene Funktionale zur Auswahl, womit es möglich wird, aus verschiedenen bekannten Größen auch unterschiedliche Kombinationen von gesuchten Formparametern bestimmbar zu machen. Im Anschluß an diesen Entwurfsprozeß sind dann alle weiteren Hilfsmittel des Numerischen Tanks Propulsion der SVA zur Bewertung des entworfenen Propellers einzusetzen.

Der oben angedeutete Ansatz zur Formoptimierung von Propellern soll nur den Anfang eines auf lange Sicht tragfähigen Konzeptes werden. Dabei stehen Fragen nach der Auswahl eines bestmöglichen Gütekriteriums (die Wirkungsgradmaximierung ist sicher nur eines von vielen möglichen) und der Globalisierung der Verfahren im Mittelpunkt und sollen Gegenstand eines zweijährigen Forschungsvorhabens werden.

Die hier vorgeschlagene Entwurfstrategie wurde bereits für verschiedene Propellerentwürfe erfolgreich eingesetzt. Erste Messungen ergaben einen deutlichen Wirkungsgradgewinn bei gleichzeitiger Abnahme der Kavitationsgefährdung. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sollen die erreichten Resultate weiter vertieft und vervollkommen werden.

4 Beispiel

Für ein Motorgüterschiff war im Rahmen eines Forschungsvorhabens ein Propeller (mit Vorleiteinrichtung am Hinterstegen) zu entwerfen. Nach einer Voroptimierung mittels WAGENOPT wurde dieser Propeller einer Nachoptimierung mittels VORTEX im Sinne der beschriebenen Verfahren mit einer völlig geänderten Wölbungs- und Rake-Verteilung unterzogen. Die folgende Grafik (Abb. 4) gibt die theoretisch ermittelten Freifahrtkurven für den bisher verwandten und den optimierten Propeller wieder.

Die Messungen an den Modellen p1255 bzw. p1257_2 (vgl. [9]) im Kavitationstunnel der SVA bestätigten diese Resultate zunächst unter Freifahrtbedingungen.

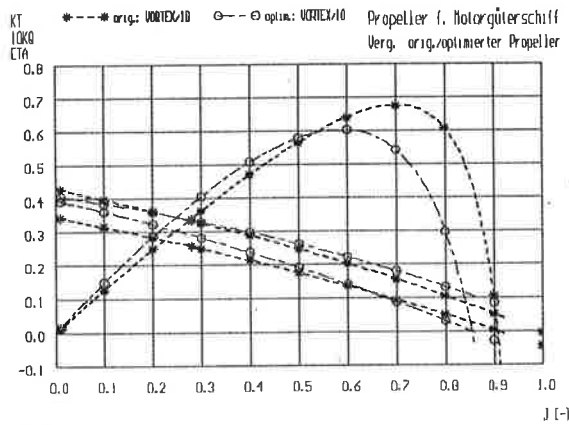


Abb. 4.

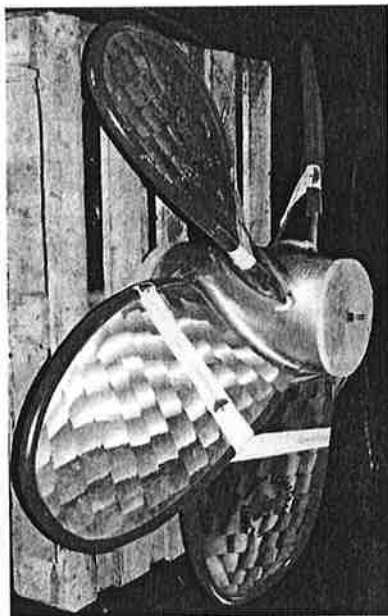


Abb. 5. Leistungseinsparung durch Propelleroptimierung mit VORTEX SVA-Propeller für Motorgüterschiff mit Vorleiteinrichtung.

Die Messungen im Nachstromfeld fielen noch deutlich besser für den optimierten Propeller aus.

Die prognostizierten erheblich günstigeren Kavitationseigenschaften des optimierten Propellers bestätigten sich auch an Hand von Beobachtungen im Nachstromfeld mit und ohne Vorleiteinrichtung. Bis auf einen praktisch unvermeidlichen Spitzenwirbel wies er auch in dem ungünstigen Nachstromfeld dieses Motorgüterschiffes keine Kavitationserscheinungen auf im deutlichen Gegensatz zu dem Vergleichspropeller, der bereits größere Saugseitenkavitation aufwies.

Wir ließen den Propeller nach unseren Entwürfen bauen und untersuchten ihn im Vergleich zum bisher verwandten Propeller. Die Großausführungsmessungen ergaben am Motorgüterschiff "Rogätz" eine deutliche Leistungseinsparung (Abb. 5). Da der Propellerhersteller nicht bereit war, den ursprünglich berechneten optimalen Steigungsverlauf zu realisieren, waren wir gezwungen, lediglich den Wölbungs- und rake-Verlauf zu optimieren. Durch die relativ starke Veränderung (Vergrößerung) der Wölbungsverteilung verschlechterten sich die Rückfahreigenschaften des Schiffes.

Bei den vergleichenden hier dargestellten Großausführungsmessungen müssen sicher noch Korrekturen angebracht werden, da der Vergleichspropeller nicht mehr der Neueste war. Aber der Vergleich von Modelluntersuchungen im Nachstromfeld mit Dummymodell und die hier dargestellten Großausführungsmessungen lassen in diesem Fall Wirkungsgradverbesserungen (mit Leiteinrichtung) bis zu 20 % wahrscheinlich erscheinen.

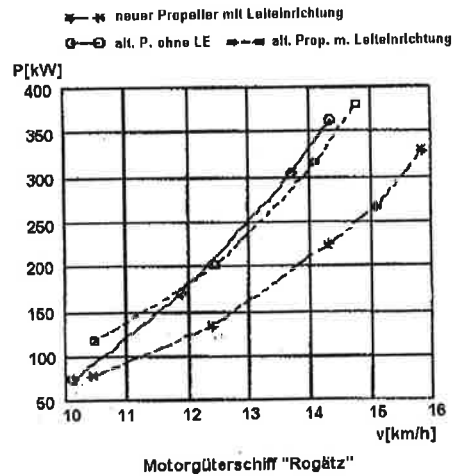


Abb. 5. Leistungseinsparung durch Propelleroptimierung mit VORTEX SVA-Propeller für Motorgüterschiff mit Vorleiteinrichtung.

5 Schrifttum

- 1 Kerwin, J.E. and Lee, C.S.: Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory, Trans. SNAME, Vol. 86, 1978
 - 2 Greely, D. S. and Kervin, J.E.: Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow, Trans SNAME, Vol. 90, 1982, pp. 415-453
 - 3 Boswell, R.J.: Design, Cavitation Performance, and Open-Water Performance of a series of Research Skewed Propellers, Report 3339, Department of the Navy, Naval Ship Research and Development Center, Washington, D.C. 20034, March 19971
 - 4 Chao, K.-Y.; Streckwall, H.: Berechnung der Propellerumströmung mit einer Vortex-Lattice-Methode, Schiffbau-technische Gesellschaft, Jahrbuch Band 83, 1989
 - 5 20 th. ITTC, Proceedings Volume 1, San Francisco, Sept. 19-25. 1993
 - 6 Praefke, E.: Auslegung des Propellers, HSVA Bericht, 1992
 - 7 Schulze, R.: Beschreibung des Propeller-File-Formates (PFF-file) Version SVA Bericht 2017, Potsdam 1993
 - 8 Schulze, R.: Na2chrechen- und Entwurfsverfahren für den Propellerentwurf, 1. SVA-Forum "Numerischer Tank", Potsdam 2.3.1995
 - 9 Schulze, R.: Propellerumströmungs- und Festigkeitsberechnung mit VORTEX und ANSYS, Teil1: Berechnung der Propellerumströmung mit dem Wirbelgitterverfahren VORTEX (0), SVA-Bericht 2163, Potsdam, August 1995
 - 10 Bohm, M.: Propellerumströmungs- und Festigkeitsberechnung mit VORTEX und ANSYS, Teil2: Berechnung der Propellerfestigkeit, SVA Bericht 2162, Potsdam, August 1995
 - 11 Schulze, R.: Projektstudie zur Entwicklung eines Programmes zur optimalen Gestaltung von Schiffspropellern, SVA Bericht 2030, Potsdam 1994
 - 12 Schwetlick, H.: Numerische Lösung nichtlinearer Gleichungen, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1979
 - 13 Großmann, Ch.; Kaplan, A. A.: Strafmethoden und modifizierte Lagrangefunktionen in der nichtlinearen Optimierung, Teubner Texte zur Mathematik, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1979
-