Erweiterung des Programms OpenProp um die Berechnung kontrarotierender Propeller

Development of OpenProp for the Computation of Contra-Rotating Propellers

Dipl.-Ing. **Lars Koopmann**
Technische Universität Berlin

Summary. In comparison with conventional single propellers contra-rotating propellers frequently enable a higher efficiency. Due to the increase in possibilities realizing a contra-rotating set this propulsor represents a considerable alternative. OpenProp is an open source suite that can be used for the design of conventional single and ducted propellers up to now. OpenProp was developed further in order to compute contra-rotating propellers. Resulting OpenProp v2.3 CR uses a steady vortex lattice lifting line theory. The computation of the contra-rotating set is based on an iterative procedure calculating the two components separately. In order to take the interaction into account the velocities induced by the other propeller are included. OpenProp v2.3CR enables to optimize important parameters of contra-rotating propellers. Hence OpenProp v2.3CR is a suitable open source tool for the hydrodynamic design of a contra-rotating set.

Zusammenfassung. In vielen Fällen ermöglichen kontrarotierende Propeller gegenüber konventionellen Einzelpropellern einen größeren Wirkungsgrad. Da zur Umsetzung eines kontrarotierenden Propellerpaares eine zunehmende Bandbreite technisch realisierbarer Antriebskonzepte zur Verfügung steht, stellt dieses Propulsionssystem somit eine beachtenswerte Alternative dar. Das Open-Source-Programm OpenProp, welches bislang nur für den Vorentwurf von konventionellen Einzelpropellern und Düsenpropellern zur Verfügung stand, wurde um die Berechnung kontrarotierender Propeller erweitert. Das resultierende Programm OpenProp v2.3CR basiert auf einem stationären Wirbelgittertraglinienverfahren. Die Berechnung des kontrarotierenden Propellerpaares erfolgt nach dem Ansatz der iterativen Berechnung der Einzelpropeller unter Berücksichtigung der gegenseitigen Induktion von Zusatzgeschwindigkeiten. Mittels OpenProp v2.3CR können wesentliche Parameter des Propellerpaares optimiert werden. Mit OpenProp v2.3CR steht eine geeignete Open-Source-Lösung für den hydrodynamischen Vorentwurf kontrarotierender Propeller zur Verfügung.

1 Einleitung

Zur Erforschung der bislang weitestgehend unbekannten Tiefsee bedarf es zuverlässiger, aber auch bezahlbarer Technik. Das Forschungsprojekt „Druckneutrale Systeme für die Tiefsee“, das vom Fachgebiet Mikrotechnik

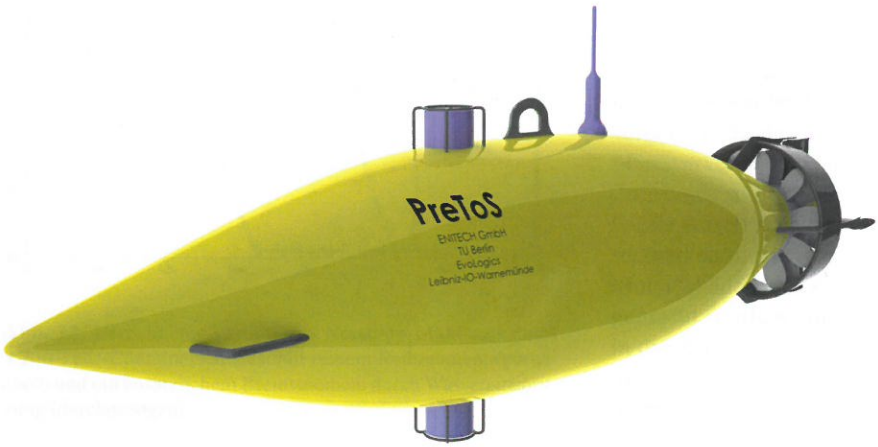

Abb. 1. CAD-Modell des autonomen Unterwasserfahrzeugs PreToS; Quelle [1]

der TU Berlin, ENITECH (Energietechnik Elektronik GmbH), EvoLogics GmbH sowie dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde bearbeitet wird, hat die Entwicklung eines neuartigen autonomen Unterwasserfahrzeugs für Wassertiefen bis 6.000 m zum Ziel [1]. In Abb. 1 ist das CAD-Modell des Fahrzeugs dargestellt. Autonom in der Tiefsee operierende Fahrzeuge sind auf ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit und Energieeffizienz angewiesen. Hieraus ergeben sich zugleich die Anforderungen an die Propulsion: Ein möglichst großer Wirkungsgrad und ein redundantes Antriebskonzept sind unverzichtbar. Diese Anforderungen können in idealer Weise durch die Verwendung von kontrarotierenden Propellern erfüllt werden.

Für den Vorentwurf von konventionellen Einzelpropellern und Düsenpropellern steht das Open-Source-Programm OpenProp zur freien Verfügung [2]. Für den Entwurf kontrarotierender Propeller existiert kein vergleichbares Programm. Ziel der Diplomarbeit [3] war es, OpenProp um die Berechnung kontrarotierender Propeller zu erweitern. Der folgende Artikel gibt einen Überblick über die verfolgten Ansätze und das resultierende Programm OpenProp v2.3CR.

2 Kontrarotierende Propeller und deren Entwurf

Kontrarotierende Propeller – zwei dicht hintereinander koaxial angeordnete Propeller, die in entgegengesetzter Richtung drehen und jeweils aktiv angetrieben werden – besitzen gegenüber konventionellen Einzelpropellern eine Reihe von Vorteilen [4].

1) Abhängig von den Randbedingungen kann durch die Verwendung eines gegenläufigen Propellerpaares ein höherer Wirkungsgrad erzielt werden, als dies bei Verwendung eines konventionellen Einschraubenantriebs mit einem Propeller gleichen Durchmessers der Fall wäre. Die Wirkungsgradsteigerung resultiert zum einen aus der Schubaufteilung auf zwei Propeller – der Schubbelastungsgrad der einzelnen Komponente sinkt, und gemäß der Strahltheorie steigt der ideale Wirkungsgrad. Zum anderen wird ein Teil der im Propellerstrahl des vorderen Propellers enthaltenen Drallenergie zurückgewonnen.
2) Die kleineren Flügelbelastungen reduzieren die Kavitationsgefahr.
3) Das Propellerpaar kann so ausgelegt werden, dass kein Reaktionsmoment auf das Fahrzeug übertragen wird. Für Unterwasserfahrzeuge bedeutet dies ein verbessertes Manövrierverhalten.
4) Die Realisierung eines redundanten Antriebssystems ist möglich.

Die Überwindung maschinenbaulicher Probleme sowie eine zunehmende Bandbreite technisch realisierbarer Antriebskonzepte, insbesondere infolge verfügbarer leistungsfähiger elektrischer Antriebe, ermöglichen neue Perspektiven für den Einsatz kontrarotierender Propeller. Da für kontrarotierende Propeller kaum Ergebnisse aus Serienuntersuchungen existieren, ist der Entwurf basierend auf theoretischen Verfahren unumgänglich. Zudem ist der hydrodynamische Entwurf eines Gegenlaufpropellerpaares durch einen gegenüber dem Einzelpropellerentwurf deutlich größeren Parameterraum geprägt. Um die Parameter beider Propeller im Sinne eines größtmöglichen Gesamtwirkungsgrades zu bestimmen, sind im Vorentwurf ausführliche Parameteruntersuchungen notwendig. Hierfür ist ein schnelles Berechnungsverfahren unentbehrlich, sodass Verfahren, die die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen lösen, nicht infrage kommen und auf klassische Verfahren wie Traglinien-, Tragflächen- oder Panelverfahren zurückgegriffen werden muss. Bei der Berechnung eines Gegenlaufpropellerpaares besteht immer die Herausforderung, die gegenseitig induzierten Axial- und Tangentialgeschwindigkeiten genau zu erfassen.

Ein Programm, das auf einem dieser klassischen Verfahren basiert, ist das Open-Source-Programm OpenProp, welches für den Vorentwurf von konventionellen Einzelpropellern geeignet ist und zur freien Verfügung steht [2] [5]. OpenProp basiert auf der Theorie der mäßig belasteten Traglinie in Kombination mit einem Wirbelgitterverfahren und ist in MATLAB geschrieben. Das Programm wurde über die letzten zehn Jahre am MIT entwickelt und baut auf dem ursprünglich von Kerwin entwickelten Programm PVL („Propeller Vortex Lifting Line Program") auf. Das Programm ermöglicht für definierte Parameter (Durchmesser, Flügelzahl, Drehzahl, geforderter Schub) den Vorentwurf eines für diese Parameter optimierten Propellers im Sinne eines minimalen Drehmoments, also maximalen Wirkungsgrades. Die Validierung von OpenProp v2.3 am Beispiel des Propellers DTMB 4119 zeigt, dass das Programm hinsichtlich der Optimierung der Zirkulationsverteilung und Berechnung der Propellerleistungscharakteristik gute Ergebnisse liefert [3].

Die Berechnung kontrarotierender Propeller mittels Traglinienverfahren ist in den vergangenen Jahrzehnten mehrfach erfolgreich umgesetzt worden. Die erste Adaption der Traglinientheorie für kontrarotierende Propeller geht auf Lerbs [6] Mitte der 1950er-Jahre zurück. Morgan [7] stellte 1960 ein praktikables Verfahren für den Entwurf optimierter kontrarotierender Propeller vor. Das Verfahren erforderte jedoch die Vorgabe gleicher hydrodynamischer Steigungsverteilungen für den vorderen und hinteren Propeller. Caster und LaFone [8] entwickelten Mitte der 1970er-Jahre aufbauend auf der Arbeit von Morgan ein iteratives Verfahren, nach welchem die Berechnung der beiden Propeller entkoppelt wurde, sodass für beide Propeller unterschiedliche Vorgaben für Steigungsverteilung und Drehzahl gewählt werden konnten. Die fremdinduzierten Geschwindigkeiten wurden mittels Kerwins „Field Point Veloci-

ty Program" bestimmt. Nelson [9] entwickelte in den 1970er-Jahren eine Reihe von Computerprogrammen für den umfassenden Entwurf von kontrarotierenden Propellern, wobei für den Detailentwurf ein Tragflächenverfahren zum Einsatz kam. Kracht [10] entwickelte 1976 an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau (VWS) Berlin ein Programm, das ebenfalls auf der Traglinientheorie basierte. Die fremdinduzierten Geschwindigkeiten wurden aus den freien Wirbeln nach Isay [11] berechnet. Cox und Reed [12] entwickelten in den 1980er-Jahren neue Traglinien-Programme, basierend auf dem Verfahren von Caster und LaFone [8], und verbesserten die Berechnung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten. 1986 entwickelten Kerwin et al. [13] ein Traglinienverfahren für kontrarotierende Propeller und andere Mehrkomponenten-Propulsoren. Anders als in den Verfahren, in denen die Propeller des Gegenlaufpropellerpaares iterativ entkoppelt berechnet werden, werden die Integro-Differentialgleichungen der Traglinien der beiden Propeller mittels Variationsansatz geschlossen gelöst. Kerwin et al. nutzten das Wirbelgitterverfahren, um die Zirkulationsverteilungen zu diskretisieren. Chen und Reed [14] stellten 1990 ein erweitertes Verfahren vor, das im Wesentlichen auf dem Wirbelgittertraglinienverfahren von Kerwin et al. [13] basiert und den Nabeneinfluss mittels Tragflächenverfahren erfasst.

3 Programmerweiterung

Ziel ist es, OpenProp um die Berechnung kontrarotierender Propeller zu erweitern und hierbei die wesentliche Programmcharakteristik zu erhalten. Hierzu zählen u.a. die Verwendung der Wirbelgittertraglinientheorie, die leistungsfähige Zirkulationsoptimierung basierend auf einem Variationsansatz sowie die Berücksichtigung der Nabe.

3.1 Lösungsansatz

Bei der Berechnung kontrarotierender Propeller ergibt sich selbst für eine homogene Anströmung wegen der gegenseitigen Induktion von Zusatzgeschwindigkeiten ein instationäres Problem. Abb. 2 zeigt das Geschwindigkeitsdiagramm an Propellerblattschnitten eines kontrarotierenden Propellerpaares mit den typischen axial und tangential fremdinduzierten Zusatzgeschwindigkeiten u_a** bzw. u_t**. Wechselwirkungen finden sowohl vom vorderen auf den hinteren als auch vom hinteren auf den vorderen Propeller statt. Mit dem Index j wird nachfolgend die Komponente gekennzeichnet, für die das Ergebnis der Wechselwirkung betrachtet wird (Wirkungsebene). Die Ebene, von der die Wechselwirkung ausgeht, wird Erzeugungsebene genannt und trägt den Index l. Der vordere Propeller trägt stets den Index 1, der hintere den Index 2.

Um das Propellerpaar mit den instationären Geschwindigkeitsverhältnissen in OpenProp berechnen zu können, wird von der Theorie der stationären Kräfte ausgegangen. Während die stationären Kräfte von über den Umfang gemittelten Geschwindigkeiten abhängen, rufen die periodischen Anteile der Geschwindigkeitskomponenten alternierende Kräfte hervor, deren Mittelwert Null ist [12].

In Abb. 3 ist das Flussdiagramm von OpenProp v2.3CR dargestellt. Einen Propeller im Sinne des Propellervorentwurfs und der Wirbelgittertraglinientheorie zu lösen

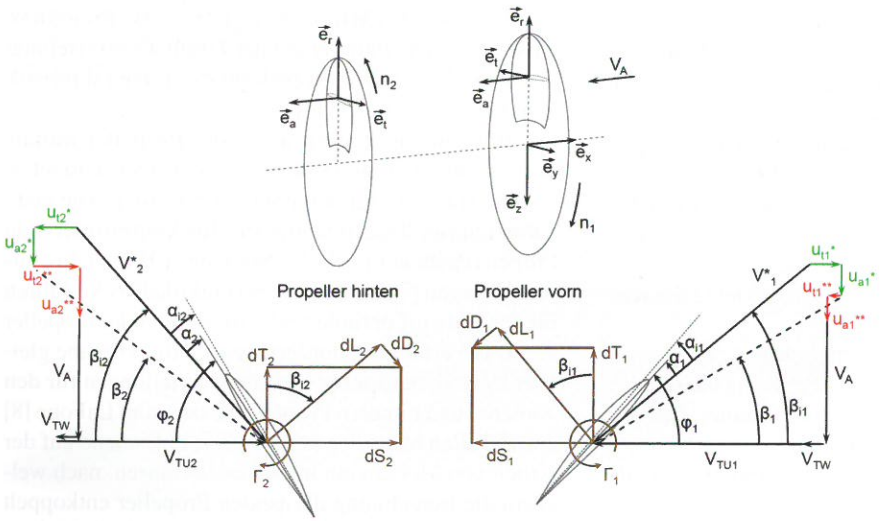

Abb. 2. Geschwindigkeits- und Kräftediagramm sowie Koordinatensysteme des Gegenlaufpropellerpaares, selbstinduzierte Geschwindigkeiten grün, fremdinduzierte Geschwindigkeiten rot hervorgehoben

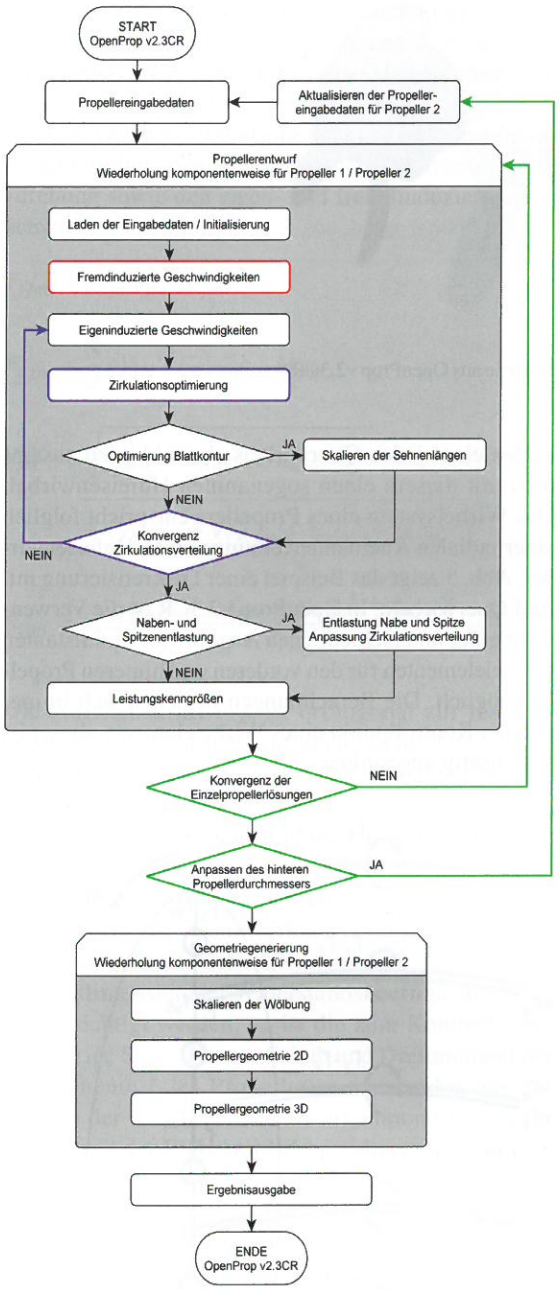

Abb. 3. Programmablaufplan OpenProp v2.3CR

bedeutet in erster Linie, eine geeignete Zirkulationsverteilung zu finden. Anschließend ist es das Ziel, eine zu dieser Zirkulationsverteilung geeignete Propellergeometrie zu entwickeln. Den beiden genannten Phasen ist die Eingabe der Entwurfsparameter vorangestellt. Neben den geometrischen Größen inklusive des Propellerabstandes sind Schub, Drehzahl sowie Parameter für die Diskretisierung und Programmsteuerung zu definieren. Darüber hinaus kann der Nutzer für verschiedene Propellerradien umfangsgemittelte Anströmgeschwindigkeiten vorgeben und hierdurch ein nachstromangepasstes Propellerpaar entwerfen.

Um das kontrarotierende Propellerpaar zu entwerfen, wird in OpenProp v2.3CR ein iterativer Ansatz gewählt, nach dem die beiden Propeller komponentenweise, d.h. wie zwei Einzelpropeller berechnet werden. In der Berechnung der jeweiligen Komponente werden neben den eigeninduzierten Geschwindigkeiten $u_a{}^*$ und $u_t{}^*$ auch die fremdinduzierten Geschwindigkeiten $u_a{}^{**}$ und $u_t{}^{**}$ berücksichtigt (vgl. Abb. 2). Dieser iterative Ansatz ermöglicht es, den Großteil des ursprünglichen Programmcodes von OpenProp weiterhin zu nutzen.

Hinsichtlich des Programmablaufs sind zwei Iterationsebenen zu unterscheiden. Auf der unteren Ebene werden die jeweiligen Einzelpropellerberechnungen durchgeführt. Entsprechend des gewählten Variationsansatzes für die Optimierung der Zirkulationsverteilung folgt ein nichtlineares Gleichungssystem, im Abschnitt 3.4 wird hierauf näher eingegangen. Die Lösung des nichtlinearen Problems wird durch iteratives Lösen des linearisierten Problems angenähert (in Abb. 3 blau hervorgehoben). Da die Lösung für eine Komponente des Propellerpaares wegen der gegenseitigen Wechselwirkungen immer von der Lösung der anderen Komponente abhängt, sind die Einzelpropellerberechnungen in eine äußere Iterationsroutine eingebunden (grün hervorgehoben). Die Berechnung eines Propellerpaares konvergiert sehr schnell. Je Einzelpropellerberechnung sind durchschnittlich 20 Iterationen notwendig, für den Gesamtentwurf genügen meist zehn äußere Iterationen. Der Entwurf eines Propellerpaares benötigt insgesamt weniger als eine Minute. OpenProp v2.3CR bietet zudem die Möglichkeit der automatischen Anpassung des Durchmessers des hinteren Propellers gemäß der Kontraktion

Tabelle 1. Hauptparameter des Propellerpaares VWS 1315/1316

	VWS 1315 (vorn)	VWS 1316 (hinten)
Drehrichtung	rechts	links
Drehzahl	$n_1 = 2{,}333\ s^{-1}$	$n_2 = 2{,}333\ s^{-1}$
Durchmesser	$D_1 = 7{,}000\ m$	$D_2 = 6{,}531\ m$
Propellerabstand	$x_f = 1{,}85\ m$	
Anzahl Propellerblätter	$Z_1 = 4$	$Z_2 = 5$
Propellerfortschrittsgeschwindigkeit	$V_A = 12{,}469\ m/s$	
Schubbelastungsgrad	$C_{Th1} = 0{,}716$	$C_{Th1} = 0{,}630$

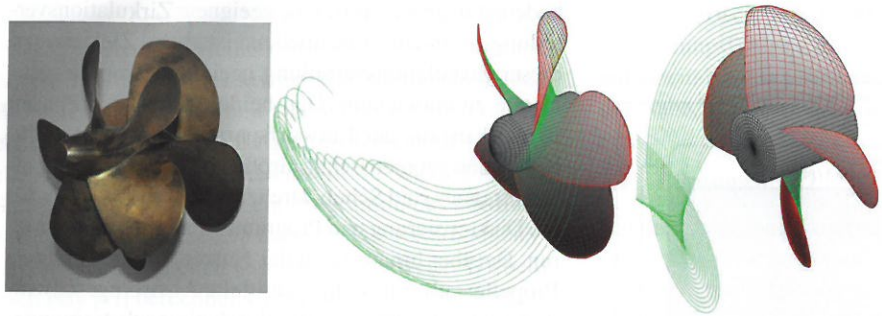

Abb. 4. Modellpropellerpaar VWS 1315/1316 und die zugehörige 3D-Geometrie aus OpenProp v2.3CR

des Propellerstrahls des vorderen Propellers. Hierdurch wird vermieden, dass der hintere Propeller von den Spitzenwirbeln des vorderen Propellers getroffen wird. Die Anpassung des hinteren Propellerdurchmessers ist ebenfalls Bestandteil der äußeren Iterationsroutine. Im Folgenden werden die Berechnung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten sowie die Zirkulationsoptimierung näher erläutert. Vorweg wird die in OpenProp v2.3CR verwendete Wirbelgittertraglinientheorie dargestellt. Das Programm OpenProp v2.3CR wurde begleitend zur Weiterentwicklung am Beispiel des Propellerpaares VWS 1315/1316 validiert. Bei diesem Gegenlaufpropellerpaar handelt es sich um einen Entwurf für ein Containerschiff. Das Propellerpaar wurde für homogene Anströmung entworfen. Der ursprüngliche Entwurf sowie die Ergebnisse der Freifahrtmessungen sind ausführlich in [10] dokumentiert. Abb. 4 zeigt gegenübergestellt das Modellpropellerpaar sowie die 3D-Geometrie als Ergebnis des Propellerentwurfs mit OpenProp v2.3CR. In Tab. 1 sind die Hauptparameter des Propellerpaares zusammengefasst.

3.2 Wirbelgittertraglinientheorie

Nach der Traglinientheorie wird jedes Blatt eines Propellers durch einen geraden gebundenen Wirbel mit einer über den Radius veränderlichen Zirkulation $\Gamma(r)$ idealisiert. Bei stationärer Anströmung und kongruenter Belastung aller Blätter genügt es, ein einziges Blatt zu betrachten. Bei der Berechnung eines Gegenlaufpropellerpaares mittels Traglinientheorie werden beide Propeller wie zwei Reihen aus gebundenen Wirbeln betrachtet. Das in OpenProp v2.3CR verwendete Wirbelgitterverfahren dient der Diskretisierung der Traglinien. Jeweils ein Gitter von M_j Querwirbelelementen jeweils konstanter Stärke Γ_{jm} bildet die Traglinien des vorderen und des hinteren Propellers ab. Der Laufindex m spezifiziert hierbei das betrachtete Wirbelelement. Die sich in der Realität und gemäß der Traglinientheorie ablösende Wirbelschicht wird nach der Wirbelgittertraglinientheorie durch M_j+1 diskrete Längswirbel idealisiert. Diese lösen sich an den beiden Enden eines jeden Querwirbels ab und bilden zusammen mit diesem einen sogenannten Hufeisenwirbel. Das Wirbelsystem eines Propellers entspricht folglich einer radialen Aneinanderreihung von M_j Hufeisenwirbel. Abb. 5 zeigt das Beispiel einer Diskretisierung mit fünf Querwirbeln. In OpenProp v2.3CR ist die Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von äquidistanten Wirbelelementen für den vorderen und hinteren Propeller möglich. Die Berechnungen beziehen sich immer auf den Kontrollpunkt eines Wirbelelements, dieser ist stets mittig angeordnet.

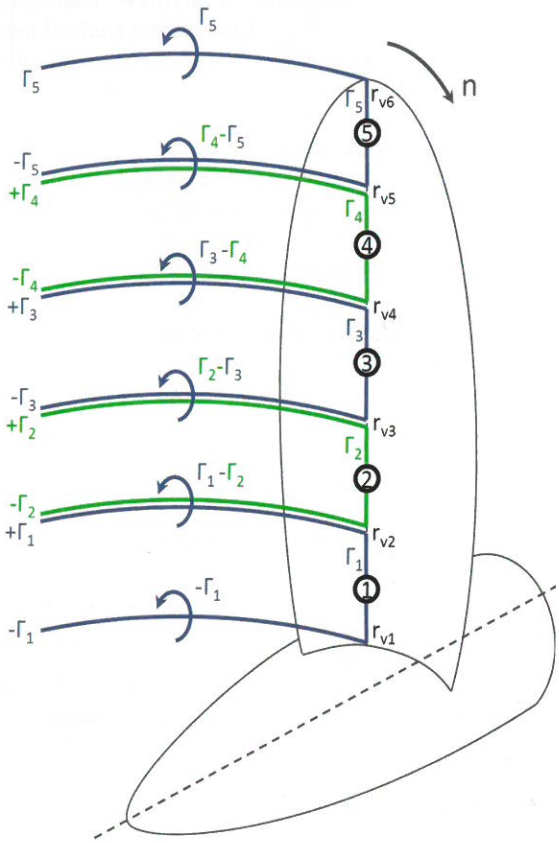

Abb. 5. Wirbelgittertraglinienmodell mit fünf Querwirbeln

Für einen Querwirbel der Länge Δr_{jm} und Zirkulation Γ_{jm} kann nach dem Satz von Kutta und Joukowski die Auftriebskraft $F_{l\,jm}$ aus Gleichung (1) bestimmt werden. $V_{jm}{}^*$ ist die resultierende Anströmgeschwindigkeit des Querwirbels und ergibt sich aus den gegebenen Geschwindigkeiten infolge Propelleranströmung und -drehung sowie den eigen- und fremdinduzierten Geschwindigkeiten (3).

$$F_{ljm} = \rho \Gamma_{jm} V_{jm}{}^* \Delta r_{jm} \tag{1}$$

$$F_{Vjm} = \frac{1}{2} \rho V_{jm}{}^{*2} C_{Dvjm} c_{jm} \Delta r_{jm} \tag{2}$$

$$V_{jm}{}^* = \sqrt{\left(V_{Am} + u_{ajm}{}^* + u_{ajm}{}^{**}\right)^2 + \left(V_{TUjm} + V_{TWjm} + u_{tjm}{}^* + u_{tjm}{}^{**}\right)^2} \tag{3}$$

$$\beta_{ijm} = \arctan\left(\frac{V_{Am} + u_{ajm}{}^* + u_{ajm}{}^{**}}{V_{TUjm} + V_{TWjm} + u_{tjm}{}^* + u_{tjm}{}^{**}}\right) \tag{4}$$

Die Auftriebskraft $F_{i\,jm}$ ist orthogonal zur resultierenden Anströmgeschwindigkeit, siehe Abb. 2. Die axiale Komponente $F_{l\,jm} cos\beta_{ijm}$ liefert einen Beitrag zum Schub T_j, die tangentiale Komponente $F_{l\,jm} sin\beta_{ijm}$ in Verbindung mit dem Radius des Kontrollpunktes r_{jm} einen Beitrag zum Drehmoment Q_j. Der hydrodynamische Anströmwinkel β_{ijm} berechnet sich nach Gleichung (4). In OpenProp kann optional eine viskose Widerstandskraft, siehe Gleichung (2), durch Vorgabe zweidimensionaler Widerstandskoeffizienten C_{Dvjm} berücksichtigt werden. c_{jm} ist die zum Kontrollpunkt zugehörige Sehnenlänge. Schub und Drehmoment der Komponente j des Propellerpaares werden aus der Summe der resultierenden Kraftkomponenten multipliziert mit der Flügelzahl Z_j berechnet, Gleichungen (5) bzw. (6).

$$T_j = Z_j \sum_{m=1}^{M_j} F_{ljm} \cos\beta_{ijm} - F_{Vjm} \sin\beta_{ijm} \tag{5}$$

$$Q_j = Z_j \sum_{m=1}^{M_j} \left[F_{ljm} \sin\beta_{ijm} + F_{Vjm} \cos\beta_{ijm}\right] r_{jm} \tag{6}$$

Bei der Berechnung kontrarotierender Propeller mittels Wirbelgittertraglinientheorie sind neben den für potenzialtheoretische Verfahren üblichen Annahmen und Vereinfachungen insbesondere die folgenden zu berücksichtigen:

- Die Strömung ist bezüglich einer zum Propeller fixierten Referenzebene stationär.
- Die Deformation der Wirbelschleppe durch Bildung des Randwirbels im Blattspitzenbereich sowie des Nabenwirbels wird vernachlässigt, und der mit der Deformation einhergehende Aufrollvorgang der Wirbelschleppe bleibt unberücksichtigt. Für schwach belastete Propeller ist diese Vereinfachung gerechtfertigt [15].
- Der Blattdickeneinfluss und die damit verbundenen Verdrängungseffekte werden vernachlässigt.
- Aufgrund der Verwendung der Traglinientheorie können nur Propeller mit moderater Blattgeometrie (gemäßigter Skew und Rake) genau genug berechnet werden.
- Die Wirbelschleppen sind räumlich kontinuierlich und bilden reguläre Schraubenflächen. Die Steigung der Schraubenfläche eines Propellers ergibt sich aus der relativen Anströmung der Blattschnitte. Aus dieser Vereinfachung folgt, dass das Geschwindigkeitsfeld des Propellers stationär wird und die Traglinientheorie anwendbar ist [10].
- Die freien Wirbelschleppen der beiden Propeller durchdringen sich, beeinflussen sich aber nicht gegenseitig. Diese Annahme ermöglicht die entkoppelte Berechnung beider Propeller.

3.3 Berechnung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten

Wie eingangs erwähnt, werden ausschließlich die stationären Propellerkräfte berücksichtigt, weshalb nur die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten betrachtet werden müssen. Die zeitlich gemittelten fremdinduzierten Geschwindigkeiten sind für kontrarotierende Propeller äquivalent zu den über den Umfang gemittelten Geschwindigkeiten in der rotierenden Referenzebene der Wirkungskomponente [16]. Dies ermöglicht eine analytische Berechnung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten basierend auf wirbeltheoretischen Verfahren. Die fremdinduzierten Geschwindigkeiten werden in OpenProp v2.3CR in Anlehnung an das Verfahren von Hough und Ordway [17] berechnet. Das Verfahren ist hinsichtlich Genauigkeit sehr gut geeignet [18]. Die in [17] dargestellten Gleichungen basieren auf dem klassischen Traglinienmodell. Das Verfahren wurde in der Vergangenheit von verschiedenen Autoren auf das Wirbelgitterverfahren adaptiert, vgl. [13], [12], [16]. Da die Gleichungen für die axial fremdinduzierten Geschwindigkeiten in den verschiedenen Veröffentlichungen voneinander abweichen und zum Teil erwiesenermaßen fehlerhaft sind [19], wurde das Verfahren von Hough und Ordway [17] erneut auf das Wirbelgitterverfahren übertragen [3]. Abb. 6 zeigt die radialen Verläufe der eigen- und fremdinduzierten Geschwindigkeiten des Propellerpaares VWS 1315/1316 in dimensionsloser Form. Den Berechnungen aus OpenProp v2.3CR sind die Ergebnisse der VWS-Entwurfsrechnung gegenübergestellt,

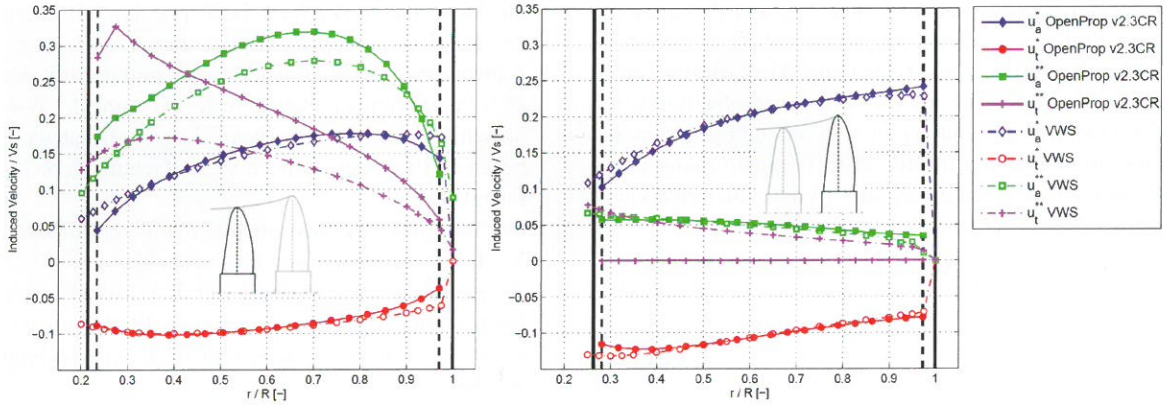

Abb. 6. Eigen- und fremdinduzierte Geschwindigkeiten für das Propellerpaar VWS 1315/1316, links für den hinteren Propeller, rechts für den vorderen Propeller, Referenzwerte nach [10]

hierin werden die fremdinduzierten Geschwindigkeiten aus den freien Wirbeln nach Isay [11] bestimmt. Während für die eigeninduzierten Geschwindigkeiten kaum Unterschiede festzustellen sind, treten für die fremdinduzierten Geschwindigkeiten deutliche Divergenzen insbesondere am hinteren Propeller auf. Bei der Berechnung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten in OpenProp v2.3CR wurden Transformationen der wirksamen Geschwindigkeiten zwecks Berücksichtigung der Strahlkontraktion durchgeführt. Trotz der Abweichungen gegenüber den Referenzergebnissen sind die Ergebnisse aus OpenProp v2.3CR für die fremdinduzierten Geschwindigkeiten realistisch einzuschätzen. In [12] werden Berechnungsergebnisse von Programmen präsentiert, die ebenfalls die fremdinduzierten Geschwindigkeiten, basierend auf der Theorie von Hough und Ordway, bestimmen. Die am hinteren Propeller berechneten fremdinduzierten Geschwindigkeiten wurden durch Geschwindigkeitsmessungen validiert und zeigten zufriedenstellende Übereinstimmungen. Insbesondere die sehr hohen fremdinduzierten Tangentialgeschwindigkeiten im Nabenbereich des hinteren Propellers (vgl. Abb. 6) sind in [12] wiederzufinden.

3.4 Optimierung der Zirkulationsverteilung

Ziel des Entwurfs eines kontrarotierenden Propellerpaares ist es, für beide Propeller jeweils eine optimale radiale Zirkulationsverteilung zu finden, sodass für einen jeweils vorgegebenen Propellerschub T_j ein minimales Propellerdrehmoment Q_j erforderlich ist.

Die Verteilung der diskreten Zirkulationen Γ_{jm} besitzt zum einen einen unmittelbaren Einfluss auf Schub T_j (5) und Drehmoment Q_j (6) des Propellers, da die Zirkulationsstärke direkt in die Auftriebskraft $F_{l\,jm}$ (1) eingeht. Zum anderen besitzt die Verteilung der

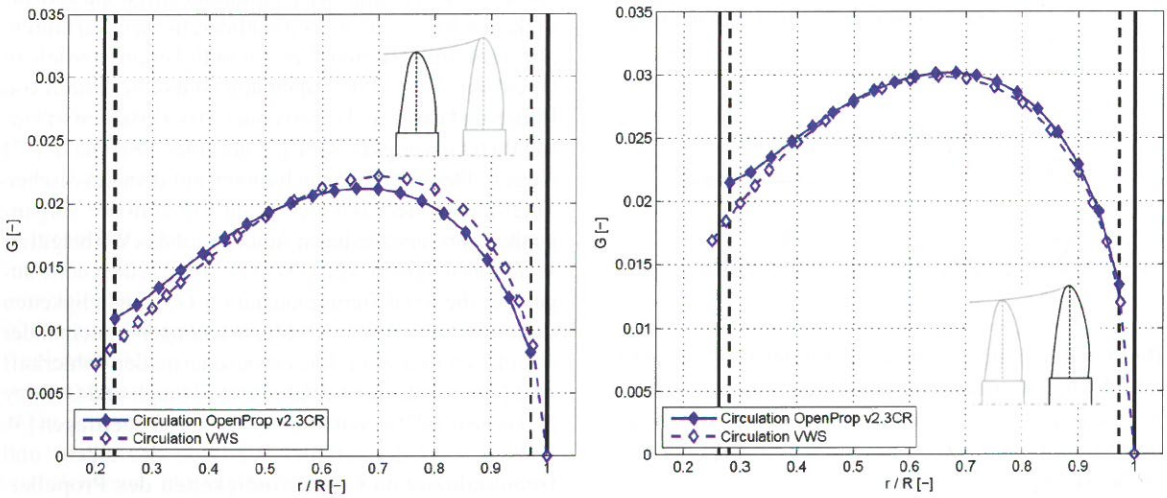

Abb. 7. Zirkulationsverteilungen für das Propellerpaar VWS 1315/1316, links für den hinteren Propeller, rechts für den vorderen Propeller, Referenzwerte nach [10]

Zirkulationen einen mittelbaren Einfluss, da die Zirkulationsstärke über die eigeninduzierten Geschwindigkeiten u_{ajm}^* und u_{tjm}^* in die resultierende Anströmgeschwindigkeit V_{jm}^* (3) und den hydrodynamischen Anströmwinkel β_{ijm}^* (4) einfließt und somit die Auftriebskraft, die Widerstandskraft F_{vjm} (2), den Schub und das Drehmoment beeinflusst. Darüber hinaus sind die Zirkulationsverteilungen der beiden Propeller eines kontrarotierenden Propellerpaares über die fremdinduzierten Geschwindigkeiten u_{ajm}^{**} und u_{tjm}^{**} miteinander gekoppelt, da diese ebenfalls in die resultierende Anströmgeschwindigkeit und den hydrodynamischen Anströmwinkel eingehen.

Ein leistungsfähiges Hilfsmittel zur Optimierung der Zirkulationsverteilung ist die Multiplikatorenmethode von Lagrange [13], [16]. In OpenProp v2.3 wurde durch Epps ein auf dieser Methode basierender Algorithmus implementiert [5]. Dieser Algorithmus wurde in OpenProp v2.3CR um die Berücksichtigung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten erweitert und ist damit für die Optimierung der Zirkulationsverteilungen eines kontrarotierenden Propellerpaares geeignet.

Das zu minimierende Drehmoment (6) ist eine Funktion der M_j Zirkulationen Γ_{jm}:

$$Q_j = f(\Gamma_{j1}, \dots, \Gamma_{jM}) \tag{7}$$

Der Schub (5) ist ebenfalls eine Funktion dieser Zirkulationen. Zudem wird an den Schub die Bedingung gestellt, dass dieser dem geforderten Schub entsprechen muss:

$$T_j - T_{rj} \overset{!}{=} 0 \quad \text{mit} \quad T_j = f(\Gamma_{j1}, \dots, \Gamma_{jM}) \tag{8}$$

Unter Einführung des unbestimmten Lagrange-Multiplikators λj lautet die Lagrange-Funktion H_j:

$$H_j = Q_j + \lambda_j (T_j - T_{rj}) \tag{9}$$

Für $T = T_{rj}$ geht das Minimum des Drehmoments mit dem Minimum der Lagrange-Funktion einher. Um das Minimum zu identifizieren, werden die partiellen Ableitungen der Lagrange-Funktion nach den Unbekannten Null gesetzt.

$$\frac{\partial H_j}{\partial \Gamma_{jm}} \overset{!}{=} 0 \quad \text{mit} \quad m = 1 \dots M_j \tag{10}$$

$$\frac{\partial H_j}{\partial \lambda_j} \overset{!}{=} 0 \tag{11}$$

Das resultierende Gleichungssystem ist nichtlinear. Die Lösung des nichtlinearen Problems wird durch iteratives Berechnen des linearisierten Problems angenähert. Wegen des Umfangs der Gleichungssysteme wird auf [3] verwiesen.

In Abb. 7 sind die radialen dimensionslosen Zirkulationsverteilungen $G = \Gamma/(2\pi R_j V)$ für das Propellerpaar VWS 1315/1316 entsprechend der Optimierung mit OpenProp v2.3CR sowie die Referenzergebnisse nach [10] dargestellt. Die Verläufe sind sehr ähnlich, kleine Abweichungen resultieren aus den unterschiedlichen Optimierungsstrategien und Methoden der Nabenerfassung sowie aus abweichenden Geschwindigkeitsverhältnissen (vgl. Abschnitt 3.3).

3.5 Leistungsberechnung

Tabelle 2 zeigt die berechneten und gemessenen Schubbeiwerte K_T, Drehmomentbeiwerte K_Q und Freifahrtwirkungsgrade η des Propellerpaares VWS 1315/1316. Die in OpenProp v2.3CR berechneten Schubbeiwerte sind stets größer als aus den Freifahrtmessungen. Die berechneten Drehmomentbeiwerte übersteigen ebenfalls die Ergebnisse der Messungen, die Abweichungen sind jedoch geringer als nach den VWS-Berechnungen. Der Gesamtwirkungsgrad des Propellerpaares wird um 2,6 % unterschätzt.

Der direkte Vergleich zwischen den Ergebnissen aus OpenProp sowie den VWS-Berechnungen und -Messungen ist nur eingeschränkt möglich. Das gemessene

Tabelle 2. Schubbeiwert K_T, Drehmomentbeiwert K_Q und Freifahrtwirkungsgrad η des Propellerpaares VWS 1315/1316, Abweichungen sind auf die Messergebnisse bezogen, dimensionslose Koeffizienten sind auf den vorderen Propellerdurchmesser bezogen

	Berechnung VWS		Berechnung OpenProp		Messung
Propeller 1315 (vorn)					
K_T	0,164	(+ 9,3 %)	0,164	(+ 9,3 %)	0,150
K_Q	0,0298	(+ 20,6 %)	0,0286	(+ 15,8 %)	0,0247
η	0,669	(- 9,3 %)	0,696	(- 5,7 %)	0,738
Propeller 1316 (hinten)					
K_T	0,126	(+ 15,8 %)	0,126	(+ 15,8 %)	0,108
K_Q	0,0247	(+ 21,0 %)	0,0231	(+ 13,2)	0,0204
η	0,618	(- 6,9 %)	0,661	(+ 2,6 %)	0,664
Propellerpaar					
K_T	0,290	(+ 12,4 %)	0,290	(+ 12,4 %)	0,258
K_Q	0,0545	(+ 20,8 %)	0,0517	(+ 14,6 %)	0,0451
η	0,647	(- 7,0 %)	0,678	(- 2,6 %)	0,696

Propellerpaar entspricht hinsichtlich der Geometrie dem VWS-Entwurf und nicht dem aus OpenProp v2.3CR. In OpenProp ist das Nachrechnen einer bestehenden Geometrie nicht möglich, es kann lediglich für identische Vorgaben ein vergleichender Entwurf angefertigt werden.

4 Potenzial des Programms

Die entkoppelte Berechnung der beiden Propeller eines kontrarotierenden Propellerpaares birgt zunächst den Nachteil, dass Entwurfsparameter wie Schub- oder Momentenaufteilung nicht unmittelbar innerhalb eines Programmdurchlaufs optimiert werden können. Der Vorteil der entkoppelten Berechnung ist jedoch die Flexibilität, die diese Vorgehensweise bietet. Parameter wie Propellerdurchmesser, Propellerdrehzahlen, Schub- und Momentenaufteilung oder Propellerabstand können mittels Parameterstudien untersucht und optimiert werden. In Abb. 8 ist das Ergebnis einer exemplarischen, in OpenProp v2.3CR durchgeführten Parameterstudie dargestellt. Eine solche Untersuchung kann, wenn sie automatisiert wird, innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden. Abb. 8 zeigt den Einfluss der Schubaufteilung für das Propellerpaar VWS 1315/1316 hinsichtlich der Wirkungsgrade der einzelnen Propeller sowie des Gesamtwirkungsgrades des Gegenlaufpropellerpaares. Wie deutlich zu sehen ist, existiert ein sehr flach verlaufendes Optimum des Gesamtwirkungsgrades. Aufbauend auf dem dargestellten Ergebnis, wäre eine Veränderung der Schubaufteilung hin zu 52 % vorn und 48 % hinten sinnvoll, da hierdurch ohne Wirkungsgradeinbußen eine Drehmomentengleichheit für den vorderen und hinteren Propeller erreicht werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem entwickelten Programm OpenProp v2.3CR wird erstmals ein Open-Source-Programm für den hydrodynamischen Vorentwurf kontrarotierender Propeller zur Verfügung gestellt.

Die Traglinientheorie ist, wie allgemein anerkannt, für die Bestimmung des Leistungsverhaltens von gering und mäßig belasteten Propellern mit moderater Blattgeometrie geeignet. Um das Gegenlaufpropellerpaar mittels Traglinientheorie berechnen zu können, muss die Theorie der stationären Kräfte angewendet werden. Eine weitere Vereinfachung besteht in der Annahme, dass sich die freien Wirbelflächen der Propeller nicht gegenseitig beeinflussen. Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen ist die Traglinientheorie auch für die Berechnung kontrarotierender Propeller geeignet.

Trotz der notwendigen Annahmen und Vereinfachungen stellt ein traglinienbasiertes Entwurfsprogramm eine sinnvolle Lösung dar. Die Einflüsse verschiedener Entwurfsparameter auf das Leistungsverhalten des Propulsionsorgans können sehr effektiv untersucht werden. Insbesondere beim Gegenlaufpropellerpaar, das sich durch eine große Zahl von Parametern auszeichnet, ist

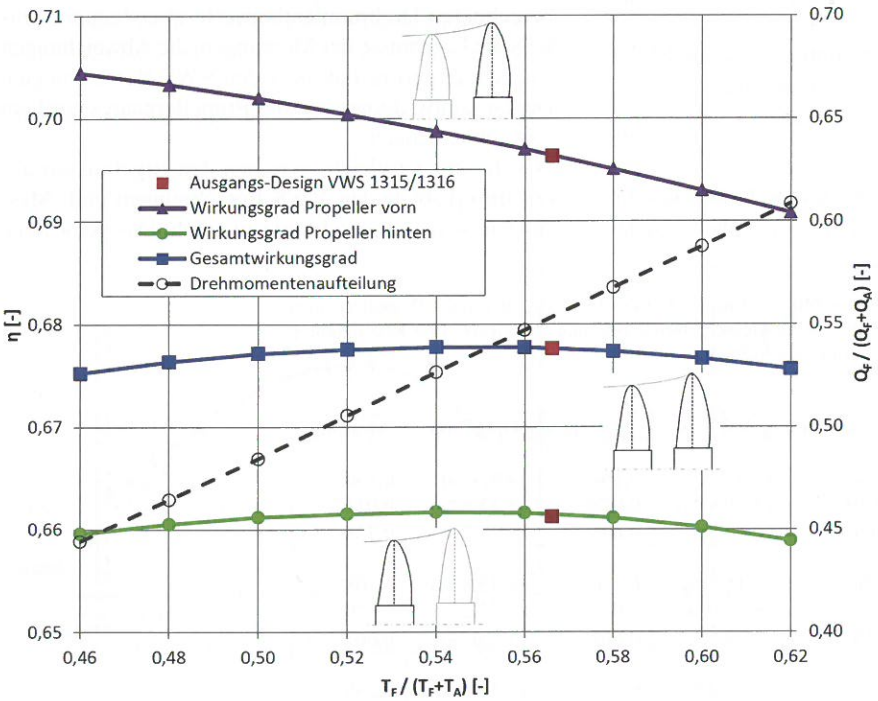

Abb. 8. Einfluss der Schubaufteilung auf Wirkungsgrade und Drehmomentenaufteilung

ein Programm, welches nur geringe Rechenkapazitäten erfordert, unerlässlich.
Mit OpenProp v2.3CR steht eine gute Basis für Weiterentwicklungen des Programms zur Verfügung. Mögliche Ansatzpunkte sind:

- Die Berechnung der fremdinduzierten Geschwindigkeiten ist weiter zu validieren, und alternative Methoden sind zu prüfen.
- Eine Diskretisierung durch nichtäquidistante Wirbelabschnitte ist anzustreben.
- Ähnlich wie im ursprünglichen Programm OpenProp v2.3 sollte auch für kontrarotierende Propeller eine automatisierte Durchführung von Parameterstudien ermöglicht werden.
- In OpenProp v2.3 ist die Berechnung des Leistungsverhaltens für Betriebspunkte außerhalb des Entwurfsarbeitspunktes möglich. Ein entsprechendes Verfahren könnte auch für kontrarotierende Propeller implementiert werden.
- Der Entwurf von Propellern hinsichtlich der geometrischen Gestaltung ist generell in OpenProp zu verbessern.

Schrifttum

1 PreToS – Pressure Tolerant Systems. Online verfügbar unter http://emos-berlin.de/Forschung/Forschungframe.html
2 Kimball, R. W.; Epps, B. P.: OpenProp v2.4 propeller/turbine design code. Online verfügbar unter http://openprop.mit.edu
3 Koopmann, L. (2011): Erweiterung des Programms OpenProp um die Berechnung kontrarotierender Propeller. Diplomarbeit. Technische Universität Berlin, Berlin
4 Kracht, A. (2000): Gegenläufige Propeller. In: Handbuch der Werften. Hamburg: Schiffahrtsverlag Hansa (25), S. 115–145
5 Epps, B. P. (2010): OpenProp v2.3 Theory Document. Technical Report. MIT Department of Mechanical Engineering
6 Lerbs, H. W. (1955): Contra-Rotating Optimum Propellers Operating in a Radially Non-Uniform Wake (DTMB Report, 941)
7 Morgan, W. B. (1960): The Design of Counterrotating Propellers Using Lerbs' Theory. In: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (Hg.): Transactions (68), S. 6–38
8 Caster, E. B.; LaFone, T. A. (1975): A Computer Program for the Preliminary Design of Contrarotating Propellers (DTNSRDC Report, SPD-596-01)
9 Nelson, D. M. (1975): A Computer Program Package for Designing Wake-Adapted Counterrotating Propellers. A User's Manual (NUC Report, NUC TP 494)
10 Kracht, A. (1976): Experimentelle Untersuchung der Schub- und Drehmomentenverhältnisse bei kontrarotierenden Propellern. Berlin (Bericht, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin, 749/76)
11 Isay, W. H. (1964): Propellertheorie. Hydrodynamische Probleme. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer
12 Cox, B. D.; Reed, A. M. (1988): Contrarotating Propellers – Design Theory and Application. In: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (Hg.): SNAME Propellers, '88 Symposium. Virginia Beach, S. 15-1–15-29
13 Kerwin, J. E.; Coney, W. B.; Hsin, C-Y. (1986): Optimum Circulation Distributions for Single and MultiComponent Propulsors. In: 21st American Towing Tank Conference. Washington, DC: National Academy Press, S. 53–62
14 Chen, B. Y.-H.; Reed, A. M. (1990): A Design Method and an Application for Contrarotating Propellers (Research and Development Report, DTRC-90/003)
15 Kornev, N. (2009): Propellertheorie. Berichte aus der Strömungstechnik. Aachen: Shaker Verlag
16 Coney, W. B. (1989): A Method for the Design of a Class of Optimum Marine Propulsors. Thesis (Ph. D.). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
17 Hough, G. R.; Ordway, D. E. (1964): The Generalized Actuator Disk (Therm Advanced Report, TAR-TR6401)
18 Hsin, C.-Y. (1986): Efficient Computational Methods for Multi-Component Lifting Line Calculations. Master Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
19 Epps, Brenden P. (2010): An Impulse Framework for Hydrodynamic Force Analysis: Fish Propulsion, Water Entry of Spheres, and Marine Propellers. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge

Erörterung

Prof. Dr.-Ing. M. Abdel-Maksoud, Technische Universität Hamburg-Harburg:
Vielen Dank für den interessanten Vortrag. Können sie uns über den Steigungsverlauf der Propeller Daten nennen?

Dr.-Ing. habil. K. Wagner, Rostock:
Wurde die Strahlkontraktion (d.h. die radialen Induktionen und die Kontinuitätsbedingung) berücksichtigt?

Dipl.-Ing. Lars Koopmann, Technische Universität Berlin (Schlusswort)
Zur Frage von Herrn Professor Abdel-Maksoud:
Der vordere Propeller des Propellerpaares besitzt ein über die Radien relativ konstantes Steigungsverhältnis von 1,0. Der Steigungsverlauf des hinteren Propellers besitzt im Bereich der dimensionslosen Radien von 0,7 bis 0,8 sein Maximum mit 1,2. Im Nabenbereich beträgt die Steigung ca. 0,85, an der Blattspitze ca. 1,05. Die in OpenProp v2.3CR errechneten Steigungsverläufe weisen gegenüber dem VWS-Entwurf eine sehr ähnliche Charakteristik auf.

Zur Frage von Herrn Dr. Wagner:
Die Strahlkontraktion wurde berücksichtigt. Während für schwach und mäßig belastete Einzelpropeller die Kontraktion des Schraubenstrahls und demzufolge auch die Kontraktion der Wirbelschleppe vernachlässigt werden kann, würde dies bei der Berechnung eines Gegenlaufpropellerpaares zu Ungenauigkeiten führen. Vor allem die am hinteren Propeller berechneten fremdinduzierten Geschwindigkeiten wären fehlerhaft.