
ABSCHLUSSBERICHT ZUM VERBUNDVORHABEN

HiOCAV

VERBESSERTE PROGNOSE DER DURCH DIE WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN SCHICHT- UND
SPITZENWIRBELKAVITATION BEDINGTEN DRUCKSCHWANKUNGEN HÖHERER ORDNUNG;

TEILVORHABEN:

VERBESSERTE NUMERISCHE PROGNOSE DER KAVITATIONSERSCHEINUNGEN AM PROPELLER UND
UMSETZUNG IM PROPELLERENTWURF

Maritime Technologien der nächsten Generation

Förderkennzeichen: 0303X501

14. JUNI 2021

OTTO PIENING GMBH

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele des Vorhabens	2
2	Bezug zu den förderpolitischen Zielen	3
3	Stand der Wissenschaft und Technik	5
4	Ergebnisse	7
4.1	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4.2	Simulation mit panMARE und PUF3a	8
4.3	Auswahl, Analyse und Aufbereitung von GA-Messdaten	9
4.4	Testfälle und Datensätzen für die Erprobung der automatisierten Auswertung	9
4.5	Parameterstudien	10
4.6	Einbindung in den Entwurfsprozess	11
4.7	Anwendung und Erprobung der numerischen Verfahren für zwei unternehmenstypische Entwürfe	12
5	Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben	14
6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	15
7	Veröffentlichungen	16

1 Ziele des Vorhabens

Bei Schiffspropellern auftretende Kavitationserscheinungen sind meistens ein unerwünschter Nebeneffekt und führen in den meisten Fällen zu weiteren Effekten wie Vibrationen und Lärm oder sogar Erosion. Der abgestrahlte Lärm stört das Leben unter Wasser und Vibrationen führen zu negativen Effekten an Bord bis hin zur Zerstörung von technischer Ausrüstung. Die Minimierung von Kavitation steht im Gegensatz zur Steigerung der Effizienz und müssen im Entwurfsprozess gegeneinander abgewogen werden.

Dem Entwerfer stehen je nach Fortgang des schiffbautechnischen Gesamtentwurfs einige konstruktive Maßnahmen zur Verfügung, um Effizienz und Kavitation zu beeinflussen. Die Maßnahmen nehmen deutlich ab, wenn ein Verstellpropeller zum Einsatz kommen soll, bei diesem sind Flügelzahl und/oder Flächenverhältnis nur im sehr begrenzten Rahmen wählbar. Insbesondere für den deutschen bzw. europäischen Spezialschiffbau (Luxus- und Verteidigungssektor) mit z.T. extremen Anforderungen an ein niedriges Schall- und Vibrationsniveau ist es außerordentlich wichtig bereits im frühen Entwurfsstadium genaue Kenntnis über die Art und Ausdehnung der Kavitation Bescheid zu wissen. Hierzu stehen numerische Prognoseverfahren zur Verfügung, die im internationalen Wettbewerb der Zulieferer den entscheidenden Vorteil bringen können.

Um die daran beteiligten deutschen Werften, Hersteller von Antriebssystemen und die Schiffbauversuchsanstalten bei der Erstellung der Prognosen für Druckschwankungen höherer Ordnung grundlegend zu stärken, ist weitere Forschung unabdingbar. Ziel des Verbundvorhabens HiO cav ist es, die Genauigkeit der Simulation von Kavitationsvorgängen an der Blattspitze von Propellern zu erhöhen sowie die numerische und experimentelle Prognose der damit verbundenen Druckschwankungen höherer Ordnung (d.h. Schwankungen, die mit mindestens zweifacher Blattfrequenz auftreten) zu verbessern.

2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Das Förderprogramm Maritime Technologien der nächsten Generation soll die globale Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Industrie in Deutschland stärken. Das beantragte Teilvorhaben entspricht mit seinem Hauptziel - der Schaffung effizienter und genauer Prognoseverfahren für die Berechnung von Kavitationserscheinungen an Propellern und den daraus resultierenden Druckschwankungen höherer Ordnung - den Zielen des BMWi-Programms Maritime Technologien der nächsten Generation. Dies betrifft zum einen die Programmziele

- Sicherheit und Umweltverträglichkeit durch Reduzierung propellererregter Druckschwankungen und der damit verbundenen akustischen Abstrahlung
- Wirtschaftlichkeit - Konkurrenzfähigkeit durch Entwicklung von hochqualitativen Propellerentwürfen bei gleichzeitiger Reduzierung des Risikos beim Entwurf
- Nachwuchsförderung und Kompetenzentwicklung durch Einbeziehung von Wissenschaftlern an Universitäten und Weitergabe des Wissens an Studenten

sowie die Langfristziele

- Volle Simulationsfähigkeit aller Entwurfs- und Produktionsprozesse
- Signifikante Steigerung der Produktivität und Kostensenkung durch eine genauere Bewertung von Propellerentwürfen im Entwurfsstadium
- Forschung entlang der Wertschöpfungsketten mit Vernetzung aller Partner

Der zuletzt genannte Punkt ist relevant, da am Vorhaben sowohl Propellerhersteller und Versuchsanstalten als unmittelbar zusammenarbeitende Partner als auch universitäre Institute beteiligt sind.

Zudem spricht das geplante Vorhaben den Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich Schiffstechnik an. Hier sind folgende Punkte zu erwähnen:

- Reduzierung aller prozess- und betriebsbedingten Emissionen
- Optimierung des Schiffsentwurfs

- Optimierte Produktentwicklungsprozesse und -werkzeuge

Ein wesentliches Problem beim Propellerentwurf ist, dass meistens die Reduzierung von Kavitation und propellererregten Druckschwankungen und die Erhöhung des Propulsionswirkungsgrades zwei gegenläufige Zielstellungen sind. Mit den zu entwickelnden Verfahren ist es möglich, den Propellerentwurf hinsichtlich seines Kavitationsverhaltens präzise zu beurteilen. Dadurch können Entwurfsreserven reduziert und ein hoher Wirkungsgrad eingehalten werden.

Dem Hauptziel des Vorhabens sind eine Reihe wissenschaftlicher und technischer Arbeitsziele untergeordnet, die im Folgenden aufgezählt werden sollen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der verbesserten numerischen Prognose des Einsatzes von Spitzenwirbelkavitation:

- Weiterentwicklung der numerischen Kompetenz und eine verbesserte numerische Prognose des Einsatzes von Spitzenwirbelkavitation
- Steigerung der Genauigkeit und Schnelligkeit von Prognosen im Hinblick auf den Kavitationseinsatz und Ausdehnung und die damit verbundenen Druckschwankungen
- Gewinnung eines tieferen Verständnisses für den Zusammenhang zwischen der Dynamik von Kavitation und den abgestrahlten Druckschwankungen höherer Ordnung
- Einbindung der neuen Prognoseverfahren in den Entwurfsprozess
- Unterstützung der Partner mit Daten und Ergebnissen aus vorhandenen Versuchen und ggf. Großausführungsmessungen bei der Entwicklung effizienter Prognoseverfahren für die Vorhersage von Kavitationserscheinungen und für die Bestimmung der propellerinduzierten Druckschwankungen

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Um Kavitationsvorgänge und Druckschwankungen numerisch zu untersuchen, stehen im Wesentlichen zwei Verfahrensfamilien zur Verfügung:

- Finite-Volumen Verfahren für viskose Strömungen: RANS- oder LES-Verfahren sowie hybride RANS-LES-Verfahren bzw. DES-Verfahren
- Randelementeverfahren für Potentialströmungen: nennenswert sind hier Paneelverfahren mit einer Quell- und Dipolverteilung

Finite-Volumen Verfahren für viskose Strömungen. Zu den gängigen Verfahren im Bereich der Strömungssimulation zählen RANS-Verfahren, bei denen die Impulsgleichung und die Kontinuitätsgleichung durch ein Finite-Volumen-Verfahren gelöst werden [4]. Das Rechengebiet muss dazu mit Volumenelementen diskretisiert werden. An den Rändern des Gebiets werden entsprechende Randbedingungen angesetzt; auf der Körperoberfläche lautet die Randbedingung, dass die Geschwindigkeit der Strömung dort der Geschwindigkeit der Körperoberfläche entsprechen muss (Wandhaftbedingung). Die Verfahren sind - anders als die o. g. Randelementeverfahren - in der Lage, viskose Effekte wie bspw. Reibungsverluste zu erfassen. Strömungsturbulenz wird bei diesen Verfahren nicht direkt erfasst, sondern durch Turbulenzmodelle makroskopisch in ihrer Wirkung simuliert. Hierzu zählt der Strömungslöser OpenFOAM.

Randelementeverfahren. Die Strömung wird bei Randelementeverfahren als Potentialströmung behandelt; dies hat zur Folge, dass viskose Effekte nicht erfasst werden können, dafür aber die Bestimmung des Strömungsfeldes stark vereinfacht wird [1]. Bei der Bestimmung der Umströmung von Körpern werden die Oberflächen der Körper mit Paneelen diskretisiert. Auf jedem Paneel werden Elementarlösungen der Laplacegleichung angesetzt, dies sind in der Regel Quellen und/oder Dipole [2], [3]. Die unbekannt Stärken dieser Elementarlösungen werden bestimmt, indem man mithilfe zweier Randbedingungen ein lineares Gleichungssystem aufstellt:

- Die Körperoberflächen dürfen nicht durchströmt werden.
- Bei Körpern mit hydrodynamischem Auftrieb (hierzu gehören beispielsweise Propellerflügel) erfolgt der Strömungsabriss an der Hinterkante des Profils. Dies ist auch als Kutta-Bedingung

bekannt.

Die Überlagerung der mit diesen Randbedingungen bestimmten Elementarlösungen ergibt das Geschwindigkeitspotenzial und damit auch das Geschwindigkeitsfeld im Raum. Aus dem Geschwindigkeitsfeld lassen sich über die Bernoulligleichung zu jedem Zeitpunkt das Druckfeld und die an den Körpern angreifenden Kräfte bestimmen. Hierzu zählt der Löser panMARE.

4 Ergebnisse

Die bei PIENING PROPELLER durchgeführten Arbeiten sind dem Strang C (Entwicklung effizienter numerischer und experimenteller Prognoseverfahren) des Gesamtvorhabens zuzuordnen.

4.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden werden die Arbeitspunkte (AP) des Teilvorhabens *HiOPie* ausführlich dargestellt. AP C.7.1 Untersuchung ausgewählter Propeller mit RANS. In diesem Arbeitspaket wurden zwei Piening typische Propellerentwürfe ausgewählt. Für diese Entwürfe lagen Modellmessungen (insbesondere Untersuchungen im Kavitationstunnel) vor.

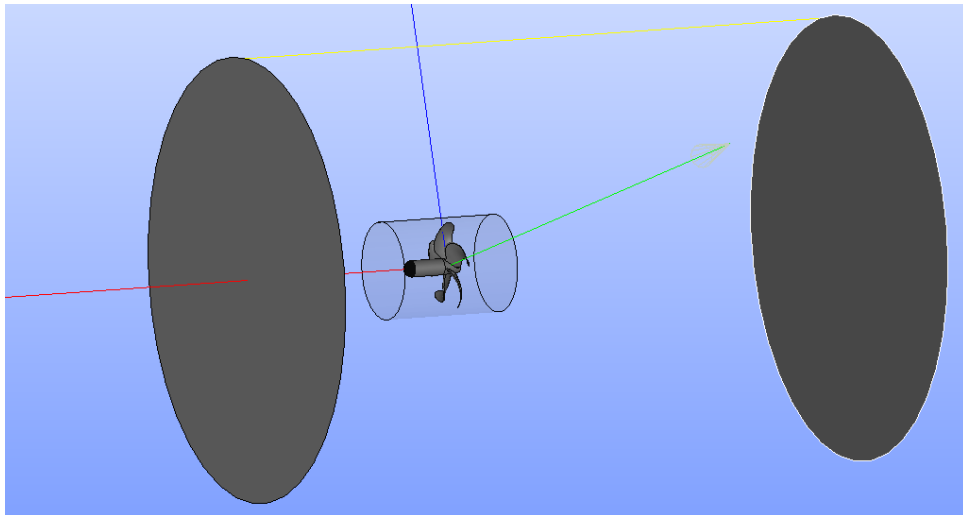


Abbildung 1: Berechnungsgebiet für die RANS Simulationen, Quelle: Eigene Darstellung

Es wurden Berechnungen der Propellerfreifahrt der ausgewählten Entwürfe mit dem RANS-Löser OpenFOAM durchgeführt. Die Untersuchungen in diesem Stadium des Vorhabens beschränkten sich auf den Modellmaßstab.

Für die Erstellung der CAD-Geometrie und der anschließenden Vernetzung des Berechnungsgebietes wurde die Salome Platform ausgewählt. Hierdurch sollte ein automatischer Prozess in Python erstellt werden. Dieser Prozess sollte aus der vorgegebenen PFF Datei die Geometrie des Propeller im CAD abbilden. In einem weiteren Schritt sollten alle relevante Flächen diskretisiert werden. Diese Methode führt zu einer einfacheren und sichereren Vernetzung mit dem cfMesh Gittergenerator. Da die

Propellergeometrie in Salome Meca nicht korrekt erstellt wurde, musste der Prozess geändert werden. So wurden das Flächenmodell des Propeller in Solidworks erzeugt. Diese Geometrien konnten im weiteren Schritt in cfMesh weiterverarbeitet werden.

4.2 Simulation mit panMARE und PUF3a

In diesem Arbeitspaket erfolgten die Simulationen der in AP C.7.1 ausgewählten Propellergeometrien mit dem am FDS entwickelten Randelementeverfahren panMARE. Es wurden die Propellerfreifahrten berechnet und den Ergebnissen aus Modellversuchen und den aus AP C.7.1 erhaltenen Resultaten gegenübergestellt. Das bei PIENING PROPELLER vorhandene und als Standardverfahren erprobte Simulationswerkzeug PUF3a wurde zum Vergleich herangezogen.

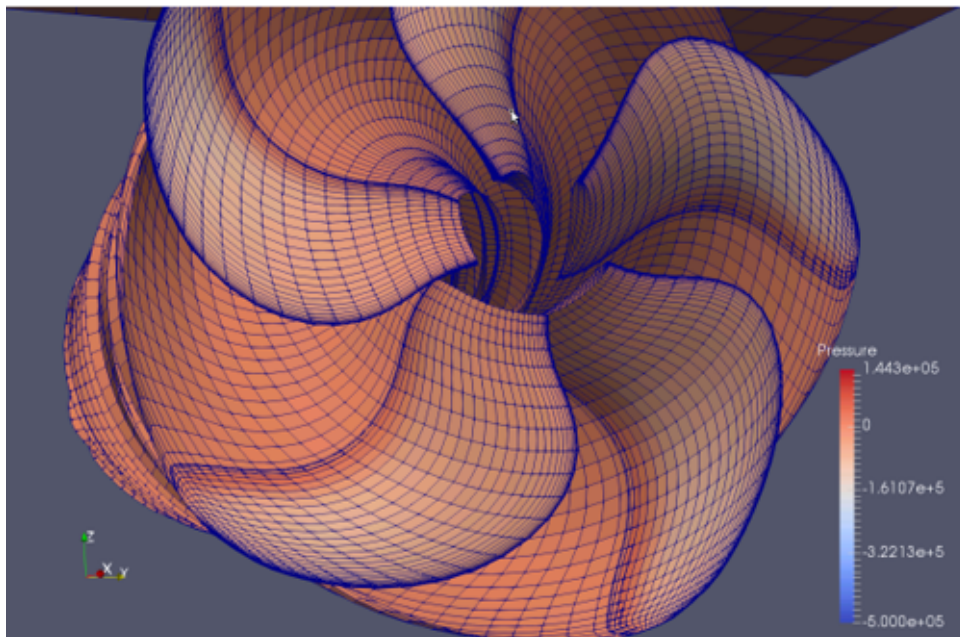


Abbildung 2: Oberflächengitter eines Propellers in der panMARE Simulation, Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Analyse der Ergebnisse muss man darauf hinweisen, dass die erzielten Resultate mit PUF3a in diesem Bericht nicht mit den langjährigen Erfahrungswerte korrigiert wurden, weshalb sie auf den ersten Blick dramatisch fehlerbehaftet erscheinen. Hierzu existieren jedoch Korrekturfaktoren für einige Propellertypen, so dass verlässliche Ergebnisse erzielt werden können.

4.3 Auswahl, Analyse und Aufbereitung von GA-Messdaten

Die angestrebten Ergebnisse aus Großausführungsmessungen stehen unter dem Schutz von Vertraulichkeitsvereinbarungen und sollen nicht verwendet werden. Um die Abhängigkeit der Resultate von der Netztopologie zu bestimmen wurden mehrere Berechnungen des gleichen Propellers mit unterschiedliche Gittertopologien simuliert. Dazu wurden aus den CAD-Modellen der Propellergeometrie zusätzliche Flächen exportiert, um diese während der Gittererzeugung als Verfeinerungszonen zu definieren. Mit dieser Technik lassen sich gerade an sensiblen Zonen wie der eintretenden Kante des Propeller aber auch an der Spitze bzw. in deren Nachlauf die Gitterstrukturen sehr gut aufbauen. Eine weitere Möglichkeit ist es die einzelnen Flügel des Propellers mit unterschiedlichen Oberflächennetzen zu erstellen. Somit kann während einer Simulation die Gitterabhängigkeit festgestellt bzw. die Simulationszeit reduziert werden. Bei der zuletzt vorgestellten Methode ist man somit gezwungen die Strömung um alle Flügel des Propellers während einer Simulation zu berechnen. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Berechnung der Strömungsverhältnisse um einen n-Fach symmetrischen Körper, wie einem Propeller, selbstverständlich auch unter Ausnutzung der in OpenFOAM implementierten Symmetriestandbedingungen möglich ist. Dabei wird bei einem 5-Flügeligen Propeller nur ein Ausschnitt von 72° vernetzt und simuliert. Dadurch sinkt der Zeitaufwand bzw. die Belegung des Simulationsrechners deutlich. Dadurch lassen sich in gleicher Zeit mehrere Variationen simulieren, z.B: um die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Gittertopologie zu bestimmen, was in etwa der zuvor vorgestellten Methode entspricht oder um Variationen der Steigungs- bzw. Wölbungsverteilung zu berechnen und somit die Effizienz des Propellers zu maximieren.

4.4 Testfälle und Datensätzen für die Erprobung der automatisierten Auswertung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden numerische Kavitationsuntersuchungen der in AP C.7.1 ausgewählten Propeller mit panMARE durchgeführt. Die Daten sollten möglichst verschiedene Schichtkavitationsformen enthalten und nach Möglichkeit durch die Verwendung verschiedener numerischer Gitter bestimmt worden sein. Bei der Bewertung der Kavitationserscheinungen mit panMARE konnten die Ergebnisse der Modellversuche nicht als Referenz dienen, da die Modellpropeller keine Kavitation im Versuch gezeigt haben.

4.5 Parameterstudien

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einfluss der Anzahl der Paneele in spannweitenrichtung eher gering ist und somit hier Paneele eingespart werden können, um die Berechnungszeit kurz zu halten.

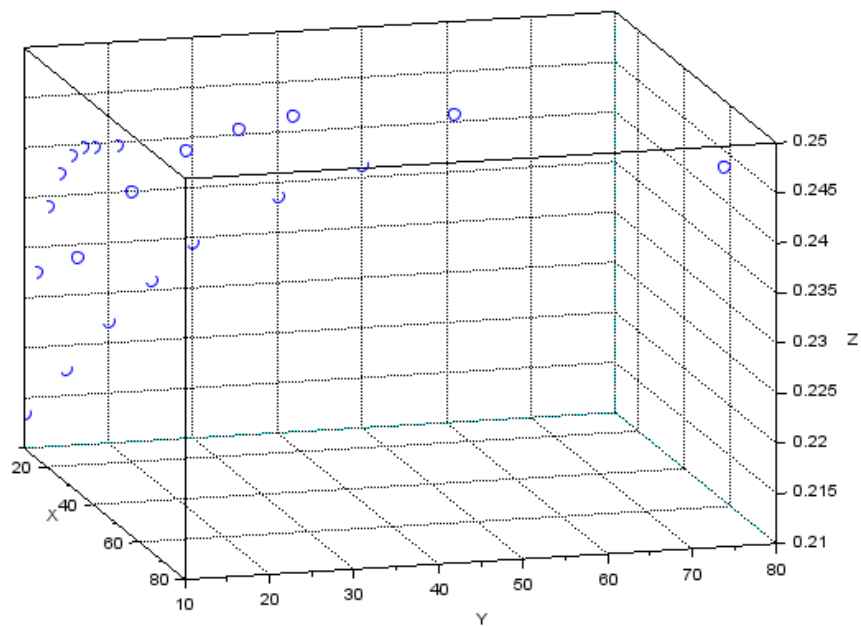


Abbildung 3: Ergebnisse einer Parameterstudie, Quelle: Eigene Darstellung

Der Einfluss der Anzahl der Paneele in Sehnenrichtung ist groß und somit das Ergebnis damit sicherer wird je mehr Paneele hier gewählt werden. Bei einer zu großen Anzahl an Paneelen entfernt sich das Ergebnis wieder vom Ergebnis des Modellversuches. Es hat sich gezeigt, dass neben der Verteilung der Paneel in radialer und Sehnenrichtung auch die Anordnung der Paneele insbesondere an der Spitze des Flügels eine wichtige Rolle spielt. Es bedarf viel Erfahrung, um eine funktionierende Einstellung der Verteilungsfunktion für scheinbar ähnliche Propellertypen zu finden.

4.6 Einbindung in den Entwurfsprozess

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Abläufe im Entwurfsprozess des Unternehmens analysiert und untersucht, welche Anforderungen sich an die Berechnungsverfahren (hinsichtlich Bedienung, Schnittstellen, aber auch Softwareumgebung) ergeben, um eine erfolgreiche Integration zu gewährleisten. Ebenfalls soll geprüft werden, inwiefern sich aufgrund der sich bietenden Möglichkeiten durch die vom Partner FDS zur Verfügung gestellten Verfahren Änderungen im Entwurfsprozess ergeben.

Bei der Otto Piening GmbH wurden seit langer Zeit diverse Programme für den Propellerentwurf z. T. selbst erstellt bzw. bekannte Werkzeuge angewendet. Die Integration des an der TUHH entwickelten Werkzeugs panMARE in den Entwurfsprozess ist sehr gut gelungen. Unser Entwurfsprozess besaß bereits ein Werkzeug zur Berechnung der hydrodynamischen Eigenschaften von Propellern somit wurde panMARE parallel dazu eingefügt. Hier wurden einige Zwischenschritte entwickelt, um vorhandene Schnittstellen aneinander anzupassen. So arbeitet panMARE mit Geometrien beschrieben im PFF Format, während das Programm MIT-PUF3a nur mit den Hauptdaten des Propellers arbeitet und daraus selbst die Profilaufmasse erzeugt.

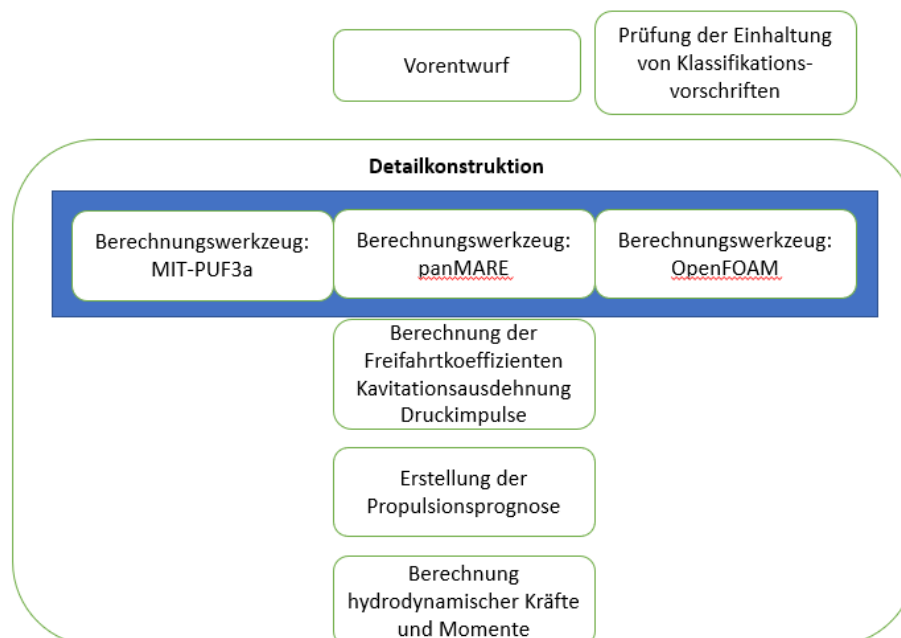
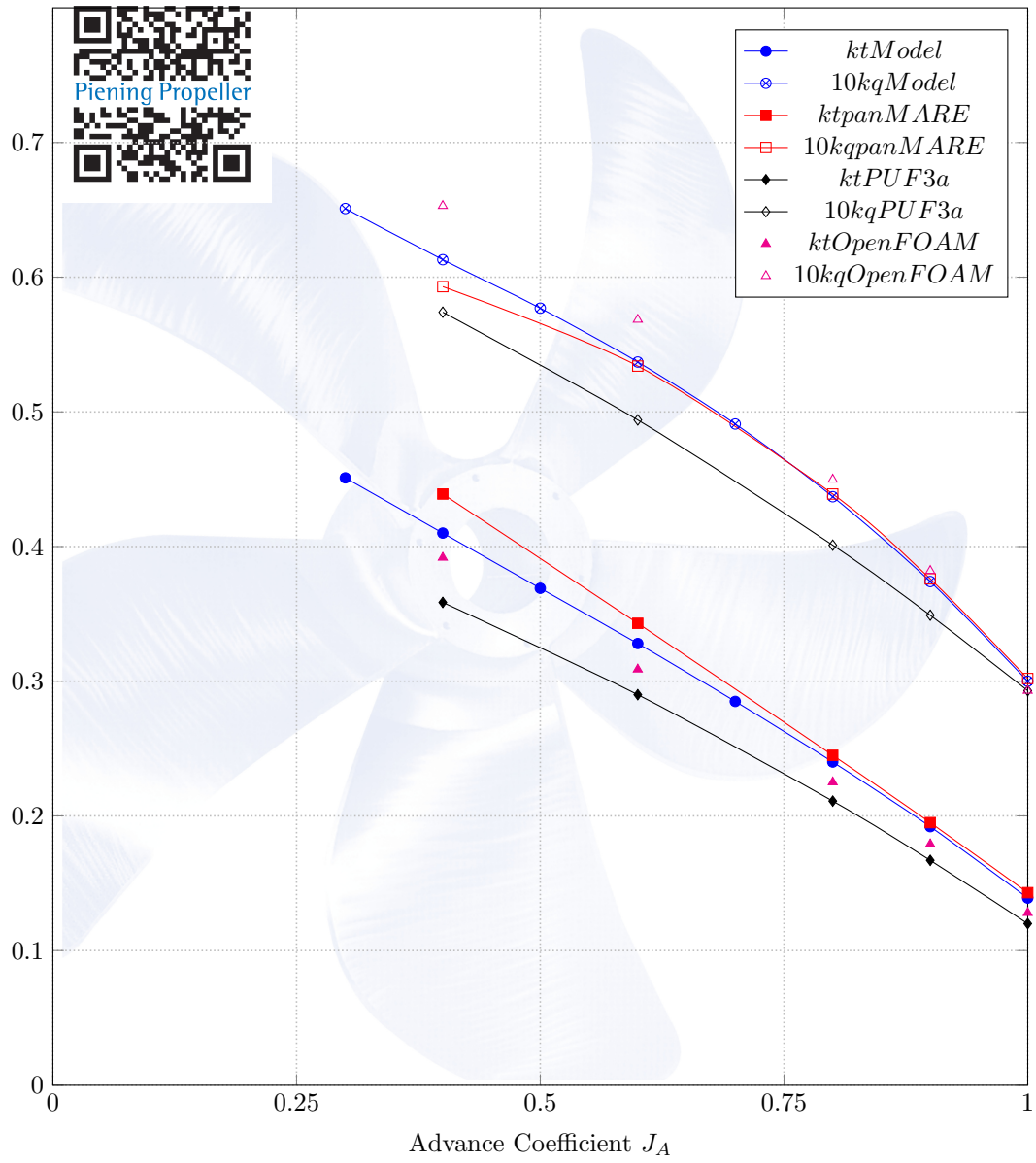


Abbildung 4: Integration der neuen Verfahren in den Entwurfsprozess, Quelle: Eigene Darstellung

4.7 Anwendung und Erprobung der numerischen Verfahren für zwei unternehmens-typische Entwürfe

Die Prognoseverfahren sollen ausführlich an Hand der ausgewählten PIE Entwürfe simuliert werden. Im Fokus steht hier die Anwendung der Verfahren auch im Hinblick auf Verstellpropeller.

Die neuen Verfahren wurden erprobt und finden begleitend zu bestehenden Unternehmensinternen Programmen weiter Anwendung. Speziell im Hinblick auf die Untersuchung von Verstellpropellern gerade auch in den sog. Off-Design conditions wird sich wohl erst gegen Ende 2023 eine Möglichkeit zur Validierung der Berechnungen ggü. einer Großausführungsmessung ergeben.



5 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Mit der Aussicht auf einen automatischen Prozess für die parametergesteuerte Erstellung von Propellergeometrien, wurde viel Zeit investiert diesen Ablauf mit dem Werkzeug Salome Platform [9] über die Programmiersprache Python zu entwickeln. Es hat sich gezeigt, dass die komplexen Oberflächen von Propellern mit hohem Skew oder mit großer Variation des Steigungsverlaufs in der Salome Platform nicht korrekt abgebildet werden. Die Abweichungen machen sich bemerkbar in verkürzten Profillängen und in falscher Steigung.

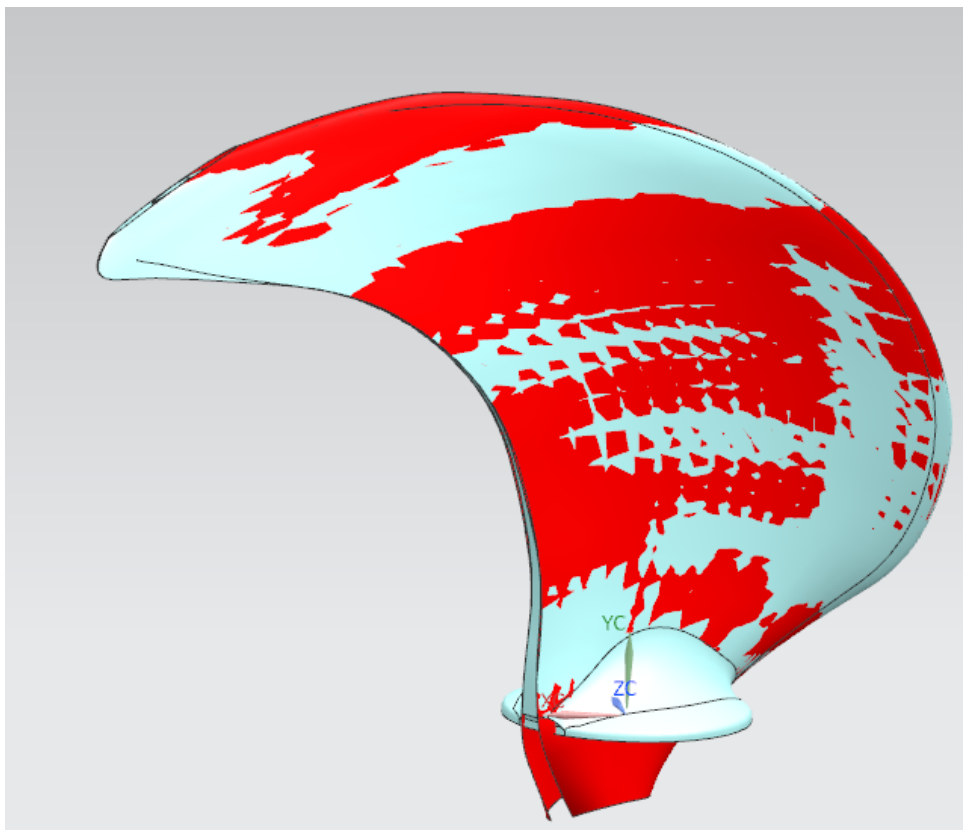


Abbildung 5: Vergleich von zwei Propellergeometrien und Visualisierung der Fehler, Quelle: Eigene Darstellung

Es war nicht Gegenstand dieses Vorhabens zu untersuchen wodurch die Ungenauigkeiten entstehen. Jedoch führen die so erstellten Propellergeometrien zu falschen Resultaten bei der Berechnung der Freifahrtkennwerte und sind damit unbrauchbar.

6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Der Verbrauch der vorgesehenen Mittel und der Zeitplan wurden eingehalten. Das Projekt wurde bis zum Ende September 2020 kostenneutral verlängert.

7 Veröffentlichungen

Während der Laufzeit wurde über Ergebnisse des Teilvorhabens durch folgende Veröffentlichungen berichtet:

Es wurden Kunden und fachkundige Besucher bei Messen, Vorträgen und in Firmenpräsentationen fortlaufend über den aktuellen Stand des Projektes in Kenntnis gesetzt. Es ist geplant fortlaufend auch nach Ende des Vorhabens die erzielten Ergebnisse und darauffolgende Anwendungsfälle durch Publikationen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Unser Beitrag zum OpenFOAM Workshop 2020 wurde angenommen, konnte aufgrund der Pandemie aber nicht stattfinden.

Literatur

- [1] Katz, J., Plotkin, A.: Low-Speed Aerodynamics, Cambridge University Press, 2004.
- [2] Hundemer, J.: Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der instationären potenzialtheoretischen Propellerumströmung, TU Hamburg-Harburg, 2013.
- [3] Vaz, G.: Modelling of Sheet Cavitation on Hydrofoils and Marine Propellers Using Boundary Element Methods, Instituto Superior Tecnico, Lissabon, 2006.
- [4] Ferziger, J. H., Peric, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, 2002.
- [5] Maric T., Höpken J., Mooney K.: The OpenFOAM Technology Primer, Sourceflux, Duisburg, 2014.
- [6] OpenFOAM User Guide, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>.
- [7] Dr. Franjo Juretic, M. Eng., Assist. Prof.: "User Guide cfMesh", Creative Fields, Ltd., 2015, https://cfmesh.com/wp-content/uploads/2015/09/User_Guide-cfMesh_v1.1.pdf
- [8] A Numerical Method For The Analysis Of Cavitating Propellers In Nonuniform Flow MIT-PUF-3A, *Users Manual*.
- [9] Salome Platform Documentation <https://www.salome-platform.org/user-section/documentation/current-release/current-release-gui>