

Ocean Technology Campus (OTC)

Abschlussbericht zum Teilprojekt OTC – Thruster – A

Teil 2: Eingehende Darstellung

Bearbeiter Dr.-Ing. Max Hieke

Universität Rostock - Lehrstuhl Strömungsmaschinen
Albert-Einstein Straße 2 · 18059 Rostock

Telefon: +49 381 498 9049

Telefax: +49 381 498 9032

E-Mail: max.hieke@uni-rostock.de

Verbundprojekt OTC - Thruster
Entwicklung einer modularen und skalierbaren Plattform für leise und vibrationsarme nabenlose Thruster-Systeme
Development of a modular and scalable platform for low-noise and low-vibration hubless thruster systems

Forschungspartner Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL)
Dr.-Ing. Joern Steinbrink, steinbrink@ial.uni-hannover.de

Lehrstuhl Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (LEA),
Dr.-Ing. Jan Fuhrmann, jan.fuhrmann@uni-rostock.de

Lehrstuhl Strömungsmaschinen (ITU),
Dr.-Ing. Matthias Witte, matthias.witte@uni-rostock.de

Förderkennzeichen 03ZU1107CA

Laufzeit 01.10.2021 bis 31.12.2025

Berichtszeitraum 01.10.2021 bis 31.12.2025

Ort, Datum Rostock, 31.12.2025
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Inhalt

1	Ursprüngliche Aufgabenstellung	3
2	Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.....	3
2.1	Erstes Jahr – Berichtszeitraum 01.11.2021 bis 30.4.2022	4
2.2	Zweites Jahr - Berichtszeitraum 01.05.2022 bis 30.4.2023	5
2.3	Drittes Jahr - Berichtszeitraum 01.05.2023 bis 31.03.2024	7
2.4	Vierte Projektberichterstattungsphase – Berichtszeitraum 31.03.2024 bis 31.12.2025	11
2.5	Zusammenfassung	14
2.6	Liste der Veröffentlichungen	15
3	Zahlenmäßigen Nachweises: die wichtigsten Positionen	16
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	16
5	Voraussichtlicher Nutzen	16
6	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	17

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts OTC-Thruster sollte ein leises und vibrationsarmes, nabenloses Antriebssystem für Unterwasserfahrzeuge entwickelt und getestet werden. Dieses sollte druckneutral und modular aufgebaut sein, wobei ein besonderer Fokus auf der hydrodynamischen Auslegung des Systems lag.

Zum einen sollte eine minimierte Schallabstrahlung Störungen des bordeigenen Kommunikationssystems und der Sensoren verhindern. Hierfür wurden bestimmte Frequenzbänder festgelegt, in denen eine Reduzierung der Schallabstrahlung besonders wichtig war.

Die Projektziele sollten durch die Bündelung der Kompetenzen des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen (ITU), des Lehrstuhls für Leistungselektronik und elektrische Antriebe (LEA) und des Industriepartners Kraken Power GmbH (Kraken) erreicht werden. Kraken war für die System- und Motorentwicklung zuständig, LEA verantwortete die Entwicklung und Erprobung eines geeigneten Antriebsumrichters, und das ITU bearbeitete hydrodynamische und -akustische Aufgabenpakete.

Dieser Teilbericht umfasst die Arbeiten des ITU zum Projektergebnis. Die Arbeiten der anderen Projektpartner werden in separaten Berichten dokumentiert.

2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Die Arbeiten am Verbundprojekt Ocean Technology Campus (OTC) – Thruster wurden im November 2021 aufgenommen. Die Aufgaben umfassten in diesem Zusammenhang den Entwurf und die Analyse eines vibrationsarmen sowie leisen Antriebssystems für autonome Unterwasserfahrzeuge (AUV). Zu diesem Zweck wurde ein Propellerantrieb konzipiert und gefertigt, der über einen elektrischen Ringmotor am äußeren Radius angetrieben wird (RIM-Drive). Dadurch ist der Einsatz einer Propellerwelle und gegebenenfalls eines Getriebes obsolet, was eine flexible Montage des Antriebs am Wasserfahrzeug ermöglicht und hydroakustische Vorteile mit sich bringt.

Das hydrodynamische Design des Propellers wurde vom Lehrstuhl für Strömungsmaschinen entwickelt, während das Design der Leistungselektronik zur Motorsteuerung vom Lehrstuhl für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (LEA) der Universität Rostock übernommen wurde.

Der Kooperationspartner Kraken Power GmbH ist bedauerlicherweise im Jahr 2023 von seinen Aufgaben zurückgetreten, weshalb das Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Universität Hannover einen Teil dieser Aufgaben übernommen hat. So wurden das Design und der Bau des dreiphasigen Elektromotors durch das IAL realisiert. Die Konstruktion der Düse sowie der Propellerkomponenten verblieb bei der Universität Rostock. Darüber hinaus mussten mehrere Aufgaben, die ursprünglich von Kraken vorgesehen waren, auf die verbleibenden Projektpartner umverteilt werden. Hierzu zählte unter anderem die Auslegung des Gleitlagers, die durch einen zusätzlichen Mitarbeiter der Universität Rostock bearbeitet wurde.

Aufgrund der zusätzlich erforderlichen Arbeiten sowie des erhöhten Abstimmungsaufwands mit dem neuen Projektpartner kam es zu Verzögerungen im Projektverlauf, weshalb eine kostenneutrale Verlängerung ab dem 1. Oktober 2024 beantragt wurde.

Die übrigen Arbeitspakete, die das Motordesign, den Bau des Motors sowie die Vorbereitung und Durchführung der Messungen des Propellersystems und die Simulation des Schallfeldes auf Basis des PCWE-Ansatzes umfassten, wurden innerhalb der verbleibenden Projektlaufzeit bearbeitet. Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse des gesamten Projektbearbeitungszeitraums vom 01.11.2021 bis zum 31.12.2025 für die Aufgaben des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen dargestellt.

2.1 Erstes Jahr – Berichtszeitraum 01.11.2021 bis 30.4.2022

Im ersten Jahr wurden die Anforderungsspezifikationen für den Thruster sowie dessen grundlegender Aufbau definiert.

Die Anforderungsspezifikationen für das Design des nabenlosen Propellers, als integraler Bestandteil des Thrusters, betreffen unter anderem die maximale Einbaugröße, die Drehzahl, der Schub sowie die benötigte Leistungsaufnahme des Propellers, bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 3-4 Knoten bzw. 1,5-2 m/s. In Tabelle 1 sind in diesem Zusammenhang die Parameter des Erstentwurfs des nabenlosen Propellers zu sehen.

Auf Grundlage Anforderungsspezifikationen wurde ein Erstentwurf mit Hilfe eines auf dem Traglinienverfahren basierenden Verfahrens erstellt. Für die Umsetzung am nabenlosen Propeller wurden unter anderem modifizierten Funktionsabschnitte des Open Source Tools OpenProp verwendet.

Die resultierenden Integralen Kenngrößen wurden anschließend auf Basis eines Hauseigenen Tragflächenverfahren-Programms im Rahmen einer Kontrollrechnungen überprüft (siehe Abb. 1).

Tabelle 1 Anforderungsspezifikationen des nabenlosen Propellers

Eingangsparameter	Wert
Leistung	bis 5 kW
Innendurchmesser	160 mm
max. Schub	100-200 N (Standschub) 100N (Freifahrt 1,5 m/s)
max. Drehzahl	1300 1/min
Fortschrittsgeschwindigkeit	1,5 – 2 m/s
max. Wassertemperatur	40°C

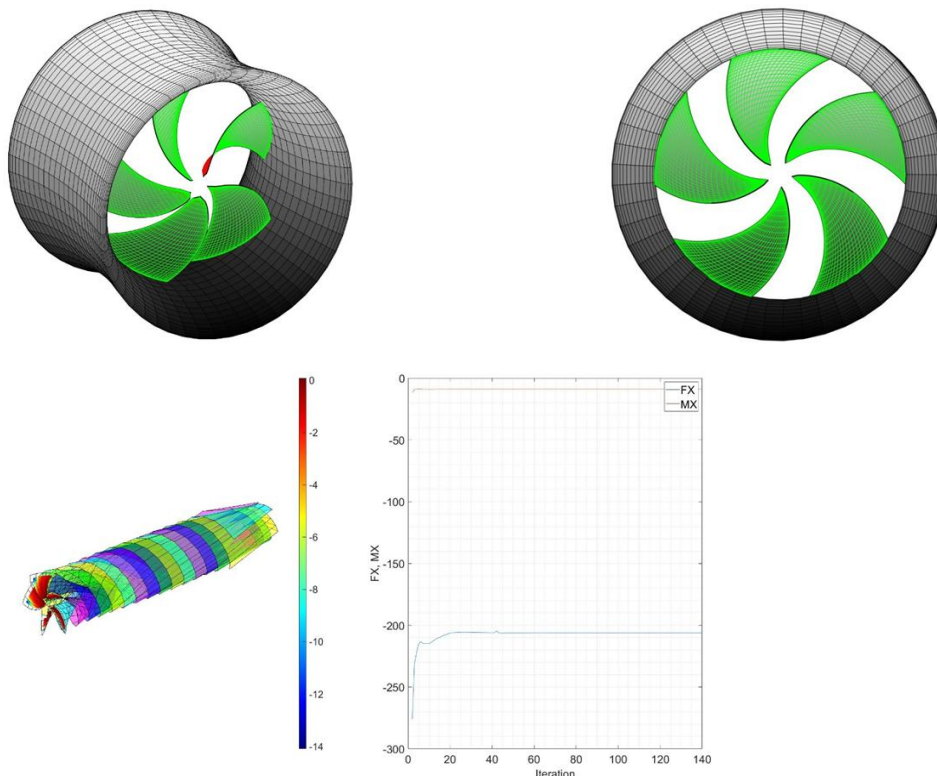


Abb.1 Erstentwurf nabenloser Propeller (oben) und Nachrechnung mittel Panelverfahren (unten)

Als Resultat ist nach einem Jahr Projektlaufzeit ein Propeller Design entstanden, welches die Anforderungen an Schub, Fahrtgeschwindigkeit etc. erfüllt.

Die Auswahl des Strömungsprofils (NACA4412), ist in diesem Zusammenhang aufgrund geringerer Druckfluktuationen im Vergleich zu anderen Strömungsprofilen gefallen.

2.2 Zweites Jahr - Berichtszeitraum 01.05.2022 bis 30.4.2023

Im zweiten Bearbeitungsjahr wurde das vorhandene Propeller Design optimiert und Funktionen für zusätzliche Modifikation der Blattvorder- und Hinterkante am Propeller mit verschiedenen Formen (Sinus, Sägezahn, Rechteck) implementiert. Diese Modifikationsvarianten wurden anschließend anhand von geraden Strömungsprofilen mittels CFD-Simulationen analysiert und die Größen für den Auftriebs- und Widerstandsbeiwert ermittelt. Im Propellerdesign gehen dann diese Größen für die Berechnung der lokalen Anstellwinkel ($\alpha = f(r)$) etc. ein. Für den nabenlosen Propeller wurde anschließend die Tuberkel-Variante ausgewählt, da Druckfluktuationen am Strömungsprofil mit dieser Bauweise reduziert werden konnten. Gleichzeitig wurde aus den Untersuchungen deutlich, dass eine geringe Amplitude der Tuberkel keinen Einfluss bzw. nur einen sehr geringen Einfluss auf die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte hat.

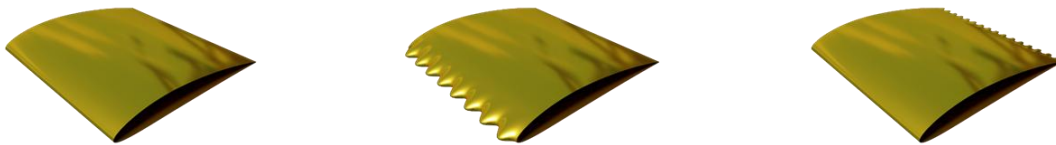


Abb.2 Ausgangsfall Strömungsprofil (NACA 4412, links), modifizierte Blattvorder- und Hinterkante auf Basis von Tuberkel (mittel) sowie Verzahnungen (rechts)

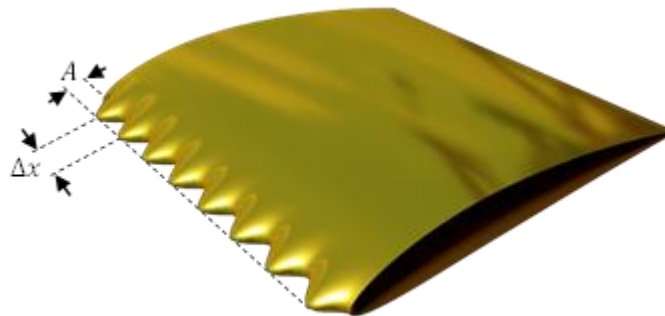


Abb.3 Parametervariation der Tuberkel an der Blattvorderkante des Strömungsprofils

Weiterhin wurden hydroakustische Messungen in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (LEA) des ersten Entwurfs der Leistungselektronik zur Steuerung des Motors vorbereitet und im Rundlaufkanal des Lehrstuhls für Meerestechnik durchgeführt. Der Messaufbau ist in Abb.4 zu sehen. Die Leistungselektronik wurde in einer Wassertiefe von etwa 0.9 m und das Hydrophon (B&K Typ 8106) im Abstand von 0.5 m zum Messobjekt positioniert. Die Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit des Frequenzumrichters, welcher später den Elektromotor des Thrusters beschaltet, im Unterwassereinsatz zu überprüfen und die hydroakustischen Schallemissionen im simulierten stationären sowie transienten Betrieb der elektrischen Komponenten zu erfassen. Im stationären Betrieb wurden hierfür festgelegte Drehzahlen des Propellers eingestellt und anschließend die resultierenden hydroakustischen Schallemissionen erfasst. Die verschiedenen Drehzahlen wurden

mittels Pulsweitenmodulation eingestellt und mit Hilfe eines Oszilloskops überprüft. Im simulierten transienten Propellerbetrieb wurden zusätzlich Drehzahl- sowie Leistungsrampen untersucht. In diesem Zusammenhang wurden Drehzahlrampen von 0 bis 22 Hz simuliert. Für die Leistungsrampe wurde die Auslegungsdrehzahl des Propellerentwurfs von 18 Hz gewählt und die Leistung von 0 bis 1,7 kW erhöht. Das Messobjekt wurde weiterhin um 90° entlang der senkrechten Achse gedreht und die Messungen wiederholt, um Aussagen zur Richtcharakteristik der hydroakustischen Abstrahlung durch den Frequenzumformer zu erhalten.

In Abb. 5 ist jeweils ein Beispiel für die hydroakustischen Abstrahlung bei simulierter Drehzahl- sowie Leistungsvariation des durch LEA entwickelten Frequenzumformers zu sehen. Es ist zu erkennen, dass bei etwa 30kHz hohe Amplituden des Schalldruckpegels auftreten. Zusätzlich sind Seitenbänder im Bereich um diese 30kHz zu sehen, dessen Amplituden mit dem Anstieg der simulierten Drehzahl bzw. der Leistung ansteigen. Im Bereich höherer Frequenzen, so auch im Falle von 60 und 90kHz, konnten die vielfachen dieser Signaturen wiedergefunden werden. Als Ursache für diese charakteristischen Signaturen konnten die Schaltgeräusche der im Frequenzumformer verbauten Halbleiterbauteile identifiziert werden. Durch die getrennte hydroakustische Analyse der elektronischen Komponenten ist es möglich, die Schallemissionen des Gesamtsystems gezielt in strömungsinduzierte und elektrisch verursachte Anteile zu differenzieren. Dadurch können die hydroakustischen Emissionen des Propellersystems einschließlich der strömungsbedingten Schallanteile eindeutig von den Schallemissionen der Leistungselektronik abgegrenzt werden. Die separate Untersuchung der Leistungselektronik ermöglicht somit, spezifische elektrische Signaturen gezielt zu identifizieren und aus der Bewertung des Strömungsschalls zu isolieren. Auf diese Weise wird eine differenzierte und belastbare Analyse der relevanten hydroakustischen Schallquellen des Systems ermöglicht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden bereits in einer aktuellen Veröffentlichung dokumentiert.

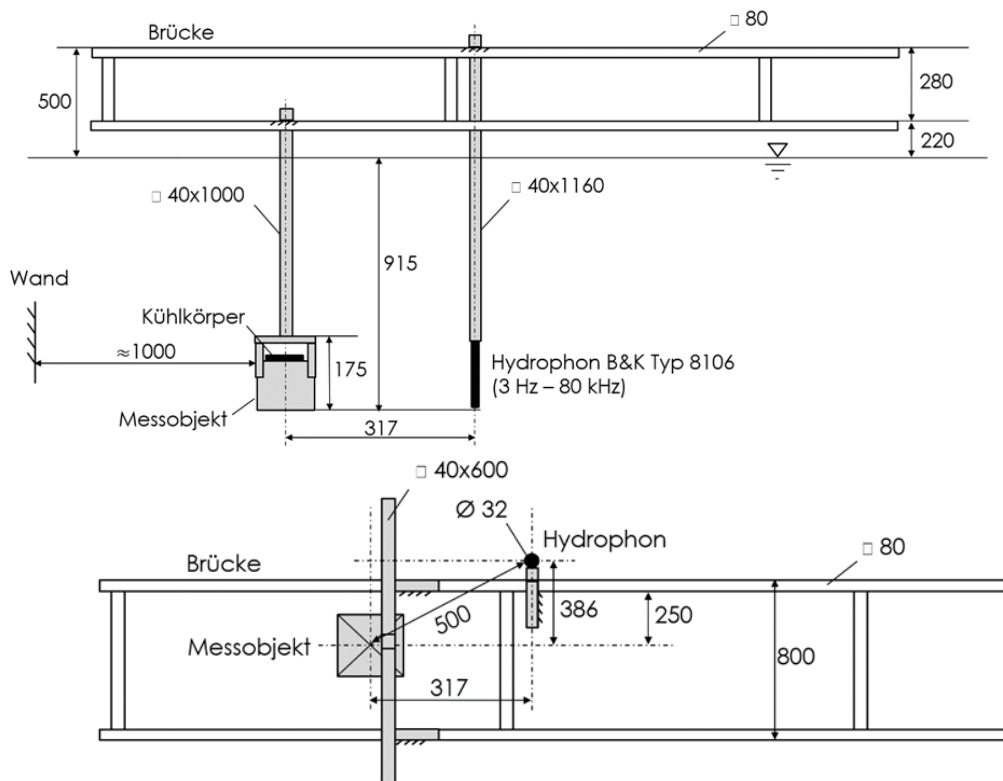


Abb.4 Skizze des Messaufbaus für die hydroakustischen Untersuchungen der Leistungselektronik. Seitenansicht (oben) sowie Draufsicht (unten)

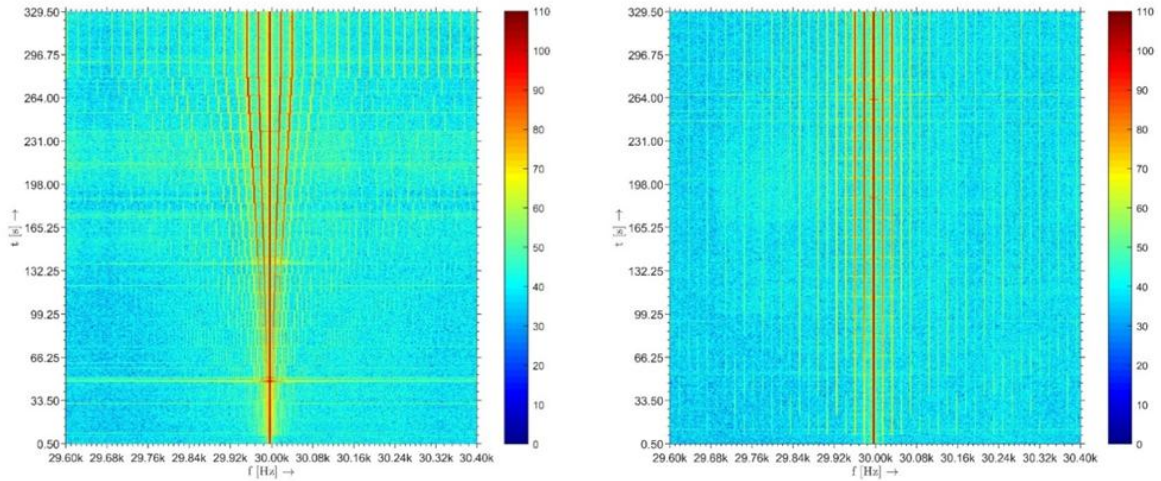


Abb.5 Spektrogramm der hydroakustischen Abstrahlung des entwickelten Frequenzumformers von LEA. Farblich dargestellt ist der Hydroschalldruckpegel $L_{p,hydro}$ re 10^{-6} Pa für Drehzahl-(links) sowie Leistungsrampen (rechts) im Frequenz zwischen von 30 kHz – 40 kHz

2.3 Drittes Jahr - Berichtszeitraum 01.05.2023 bis 31.03.2024

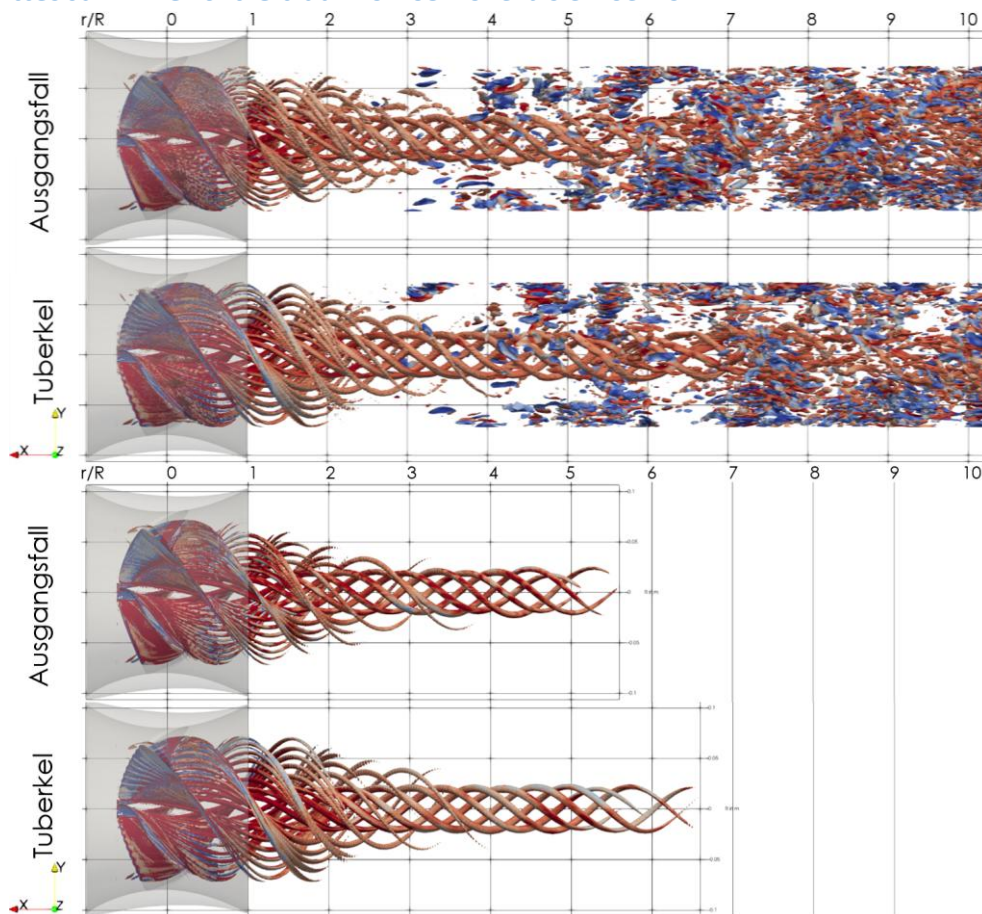


Abb.6 Wirbelkriterium für das transienten (oben) sowie das gemittelte Geschwindigkeitsfeld (unten) im Nachlauf des nabenlosen Propellers mit ohne und Vorderkantentuberkel

Auf Basis der Design-Routine zum Aufbau und zur Modifikation von 3D-Geometriedaten eines Strömungsprofils sowie der Propellerblätter samt Düse des nabenlosen Propellers (siehe Abb. 1) wurden CFD-Modelle aufgebaut und mittels SBES-Turbulenzmodell in ANSYS CFX berechnet. Für diese skalenauflösenden CFD-Simulationen wurden hexaedrische, blockstrukturierte Rechengitter mit jeweils etwa 45 Millionen Rechenzellen erstellt.

Das Freifahrtverhalten sowie der Schub und das Drehmoment weisen hierbei vergleichbare Werte auf, was für den hydroakustischen Vergleich beider Varianten wichtig ist. Im Strömungsbild hingegen konnten Unterschiede, beispielsweise im Nachlauf beider Varianten, identifiziert werden.

Die in Abb.6 dargestellte Iso-Oberfläche des Q-Kriteriums wurde für die Identifikation der Wirbel im Nachlauf des nabenlosen Propellers verwendet. Im oberen Bereich der Abbildung ist das Q-Kriterium auf Basis der instationären Strömungsgeschwindigkeit zu sehen und im unteren Bereich das der gemittelten Strömungsgeschwindigkeit. Die gemittelte Darstellung ist nur deshalb möglich, weil sich der komplette innere Bereich der Domain mit der Drehzahl des Propellers mitrotiert. Auf der linken Seite ist die Zuordnung der jeweiligen Varianten (Ausgangsfall, Tuberkel) beschriftet.

Sowohl im instationären als auch im gemittelten Strömungsfeld bildet sich ein mehrfaches, helixförmiges Wirbelsystem aus, welches einen Kernwirbel im innersten Radiusbereich beinhaltet sowie mehrere kleine Wirbel (fünf bis zehn) im äußeren Bereich. Der Wirbel im inneren Bereich bleibt im Vergleich am längsten stabil, etwa bis zur doppelten Distanz der äußeren Wirbel. Erstaunlicherweise ist der Nachlaufwirbel des Tuberkelfalls am längsten stabil (Ausgangsfall: $x/R = 5.5$, Tuberkelfall: $x/R = 6.5$), was im unteren Teil der Abb. 6 zu erkennen ist. Gleiches gilt auch für die Wirbel im äußeren Radiusbereich, die ebenfalls länger in der Strömung bestehen als die des Ausgangsfalls.

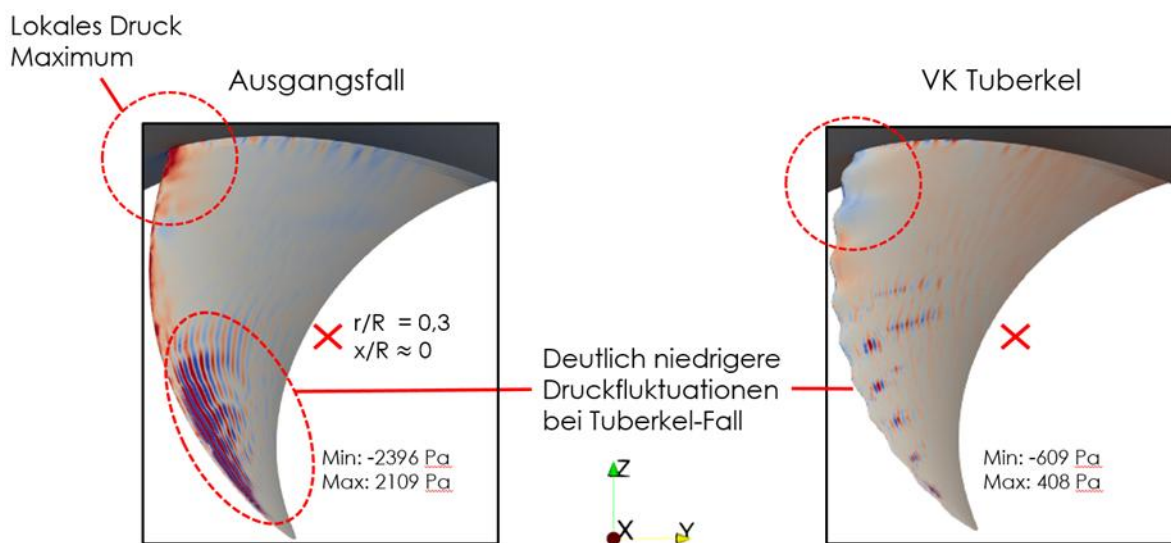


Abb.7 Druckfluktuationen auf der Saugseite eines nabenlosen Propellerblatts ohne (links) und mit Vorderkantentuberkel (rechts)

Weitere Unterschiede konnten in den Druckfluktuationen an den Propeller- und Düsenwänden identifiziert werden. In Abb.7 sind die Druckfluktuationen an dem saugseitigen Propellerblatt beider Varianten zu sehen. In der linken Abbildung sind großflächige Druckfluktuationenmuster in der unteren Hälfte des vorderen Propellerblattes zu erkennen. Im Vergleich dazu sind die Druckfluktuationen der Tuberkelvariante kaum noch zu erkennen. Weiterhin ist im Bereich der Blattwurzel ebenfalls an der Blattvorderkante ein erhöhter Druck zu sehen, dessen Amplitude sich im zeitlichen Verlauf mit der Drehposition periodisch ändert.

Die Analyse der Druckfluktuationen im Nachlauf an verschiedenen Punkten, die sich entlang der X-Achse sowie in radialer Richtung zur Propellerachse aufreihen, konnte bestätigen, dass sich durch die Tuberkelmodifikation eine Verringerung der Druckfluktuationen um bis zum zehnfachen Wert für einzelne Schaufelpassierfrequenzen (BPF) eingestellt hat (siehe Abb.8). Für Abb.9 wurde das Integral des Frequenzspektrums der Druckfluktuationen für 24 Punkte im Nachlauf berechnet. Die Analyse hat gezeigt, dass im Nachlauf bei $r/R = 0.3$ und $r/R = 0.5$ ebenfalls eine Verringerung der Druckamplituden registriert werden konnte. Im Bereich $r/R = 0.7$ konnte jedoch keine Verringerung festgestellt werden, da in diesem Bereich keine bzw. nur geringfügige Ablösungen der turbulenten Grenzschicht auftreten und die Tuberkel somit keine Verbesserung bewirken konnten.

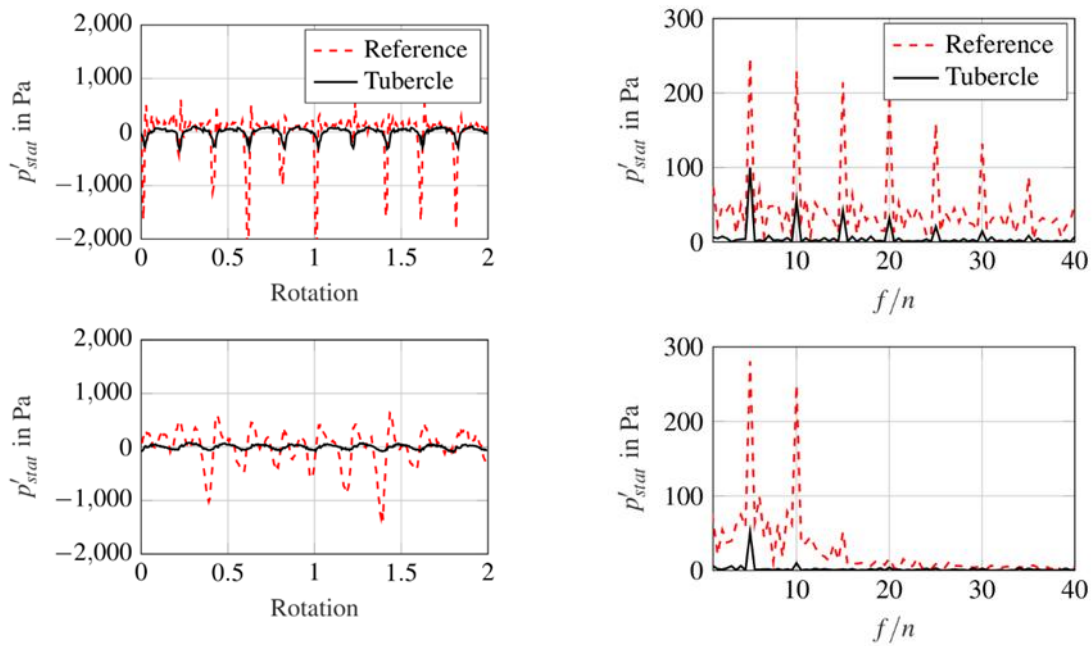


Abb.8 Druckfluktuationen im Nachlauf des Nabenlosen Propellers (links) sowie die entsprechenden Frequenzanalysen (rechts) für die Punkte $x/R = 1$ (oben) und 2 (unten) sowie $r/R = 0.5$

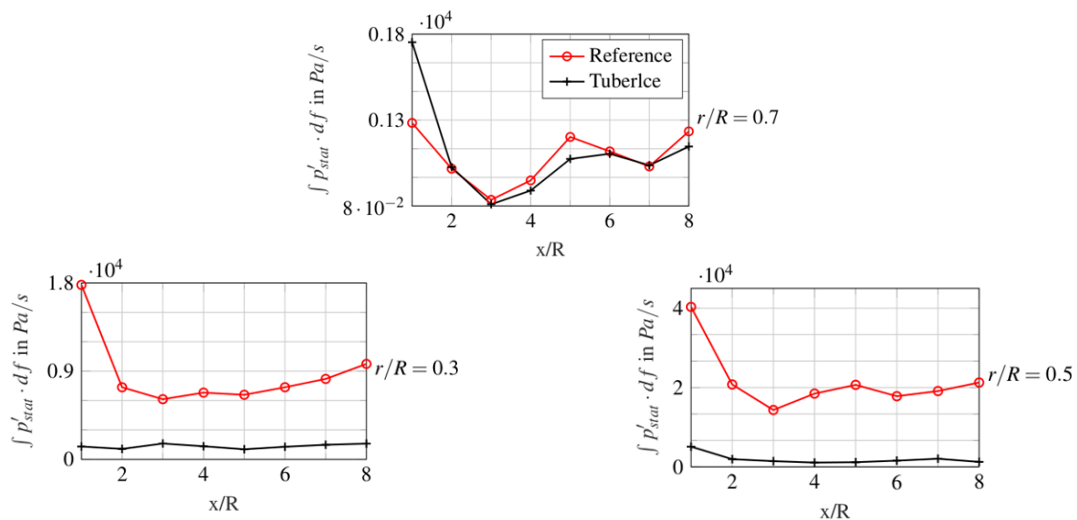


Abb.9 Integral des Frequenzspektrum der Druckfluktuationen im Nachlauf des nabenlosen Propellers (Integrationsgrenzen 1 bis 1800 Hz)

Die numerischen Analysen haben gezeigt, dass sich das Strömungsfeld beider Varianten unterscheidet und somit auch eine detailliertere Analyse der resultierenden hydroakustischen Schallabstrahlung beider Varianten Unterschiede aufweisen sollte. In diesem Zusammenhang wurde eine hydroakustische Simulation auf Basis des *Perturbed Convective Wave Equation* (PCWE)-Ansatzes mithilfe der Open-Source-Software OpenCFS vorbereitet. Hierfür werden die transienten Druck- und Geschwindigkeitsfelder einer skalenauflösenden numerischen Strömungssimulation verwendet, um die Hydroakustik in einem zweiten Schritt auf einem angepassten Rechengitter sowie mit einer angepassten Zeitschrittweite zu berechnen.

Ein Teil der Ergebnisse wurde im März 2025 auf der 16. European Turbomachinery Conference vorgestellt sowie als Paper in den Proceedings veröffentlicht.

Neben den durchgeführten theoretischen, numerischen Arbeiten wurden in diesem Berichtszeitraum umfangreiche Arbeiten von IAL, LEA und dem ITU hinsichtlich des mechanischen und elektrotechnischen Designs des Thrusters sowie dessen Baus durchgeführt. Das finale Design des Thrusters welches als Grundlage für die Fertigung durch einen externen Zulieferer diente ist in Abb.10 dargestellt.

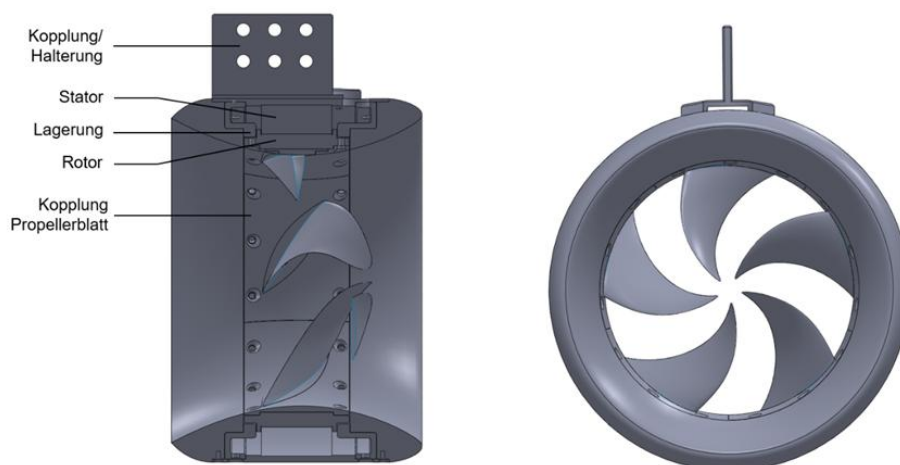


Abb.10 *Finales Design des nabenlosen Propellers (Thrusters)*

2.4 Vierte Projektberichterstattungsphase – Berichtszeitraum 31.03.2024 bis 31.12.2025

Vorbereitung und Durchführung der Messung

Die Arbeiten zum Motordesign konnte im Oktober 2024 abgeschlossen werden. Die Auslieferung aller Motorteile erfolgte jedoch erst Anfang März, weshalb mit der Messung sehr spät im Projekt begonnen werden konnte. In Abb.11 ist der Prototyp mit eingebauten Tuberkel-Propellerblättern zu sehen. Vor der Messung waren zusätzliche Inbetriebnahme Tests des Motors für eine Hallsensor-geregelte Ansteuerung des Elektromotors notwendig, um die variable Stromspannung/Stromstärke sowie Frequenz der Eingangsspannung bei Anfahrt zu erhalten.

Der Aufbau ist in Abb.12 zu sehen. Hierfür wurde der Motor ohne Propellerblätter in einem Wassertank fixiert und in Betrieb genommen. Dies war erforderlich, um erste Test mit dem hydrodynamischen Gleitlager durchzuführen und dessen Funktionsfähigkeit zu prüfen.



Abb.11 Prototyp vom nabenlosen Propeller



Abb.12 Aufbau für den ersten Inbetriebnahme Test des Thrusters

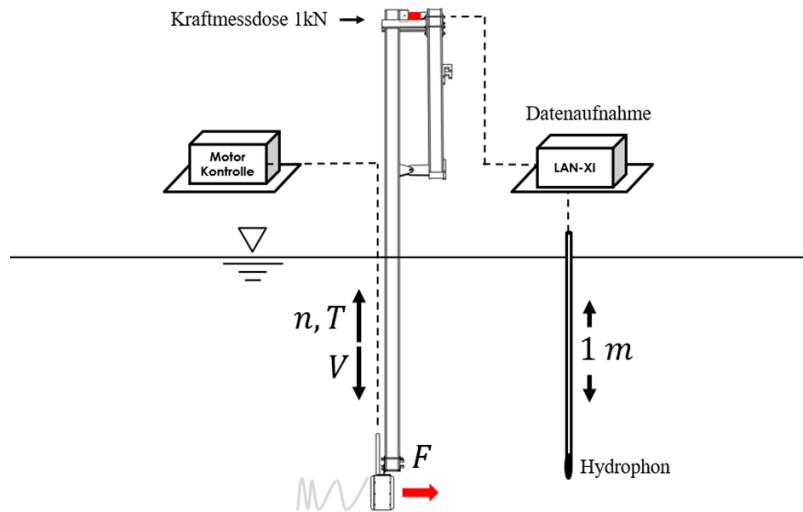


Abb.13 Messaufbau Gesamtsystem

Die Messungen des gesamten Thruster-Systems erfolgt im Umlaufkanal der Fakultät. In Abb.13 ist eine schematische Skizze des Messaufbaus zu sehen. Es wurden Schub und der Hydroschalldruck gemessen (B&K Typ 8106). Insgesamt wurden 2 Messkampagnen durchgeführt. Im Rahmen der Auswertung der ersten Messkampagne im November 2025 wurde festgestellt, dass es durch eine ungünstige Kombination von Werkstoffen, welche für das hydrodynamische Gleitlager verwendet wurden, es zu erhöhten hydrodynamischen Abstrahlungen und erhöhten Verschleiß gekommen ist. Nach der Identifizierung des Problems wurden die relevanten Komponenten des Gleitlagers aus anderen Werkstoffen gefertigt und im Rahmen der zweiten durchgeführten Messkampagne getestet und für geeignet befunden. In allen beiden Messkampagnen erfolgte die elektrische Beschaltung des Thruster-Motors mittels Block-Kommutierung. Hierbei handelt es sich um eine sehr einfache, aber robuste Variante der Beschaltung von Elektromotoren. Vom hydroakustischen Standpunkt aus gesehen stellt diese Beschaltungsart nicht den Idealzustand dar, stellt jedoch sicher, dass mögliche Fehlerquellen, bei diesen ersten Inbetriebnahme Messungen, auf die mechanischen und hydrodynamischen Komponenten des Thrusters begrenzt blieben.

In Abb.15 sind die Schmalbandordnungsspektren der Hydroschallemissionen des Thruster bei Verwendung von Propellerprofilen mit und ohne Tuberkel gezeigt. Die Hydroschalldruckpegel beider Schmalbandordnungsspektren liegen im Bereich zwischen 50 dB – 120 dB und zeigen deutlich ausgeprägte schmalbandige Amplitudenüberhöhung bzw. Tonalitäten. Diese Tonalitäten resultieren einerseits aus der Beschaltung des Elektromotors mittels Block-Kommutierung andererseits aber auch aus der Interaktion des Propellers mit dem Fluid und den dadurch resultierenden Druckfluktuationen. Letztere finden bei der sogenannten Schaufelpassierfrequenz bzw. Blade Passing Frequency (BPF) und deren höheren harmonischen Ordnungen statt ($f/n = 5,10,15, \dots, B \cdot K$).

$$BPF^K = n \cdot B \cdot K \text{ mit } K = 1,2, \dots, M \quad \text{Gl.1}$$

Die zu einer BPF Ordnung gehörende Frequenz kann als Produkt aus der Propellerdrehzahl n in s^{-1} , der Propellerblattanzahl B und der Ordnung $K=1$ kann entsprechend Gl.1 berechnet werden.

Für die Bestimmung der Unterschiede und Beurteilung der Wirksamkeit des Tuberkelkonzeptes hinsichtlich der Minderung von Hydroschallemissionen wurden die absoluten Differenzen zwischen beiden in Abb.15 gezeigten Schmalbandordnungsspektren bis zur 50. Ordnung der BPF berechnet und in Abb.16 dargestellt.



Abb.14 Messaufbau im Rundlaufkanal der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock
Oben: Aufbau fotografiert oberhalb der Wasserlinie
Unten: Aufbau fotografiert unterhalb der Wasserlinie

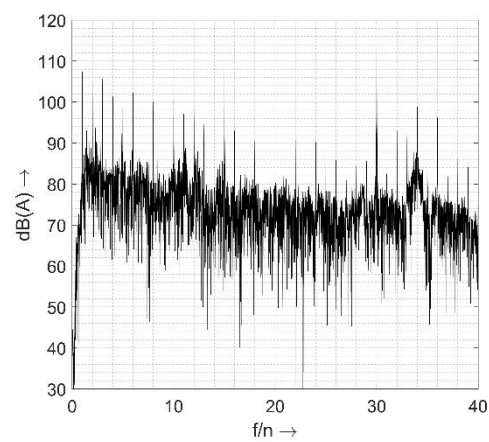
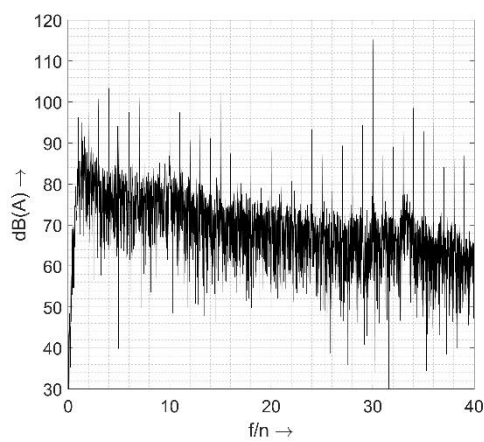


Abb.15 Schmalbandordnungsspektrum Hydroschallpegel $L_{p,hydro}$ re 10^{-6} Pa
Propellerdrehzahl: $n = 10.22 \text{ s}^{-1}$ (613.5 min^{-1})
Links: Propellerprofil ohne Tuberkel
Rechts: Propellerprofil mit Tuberkel

Anmerkung: bei einem Ordnungsspektrum ist Frequenzvektor aus den FFT-Analysen auf die Propellerdrehfrequenz n (Drehzahl) normiert

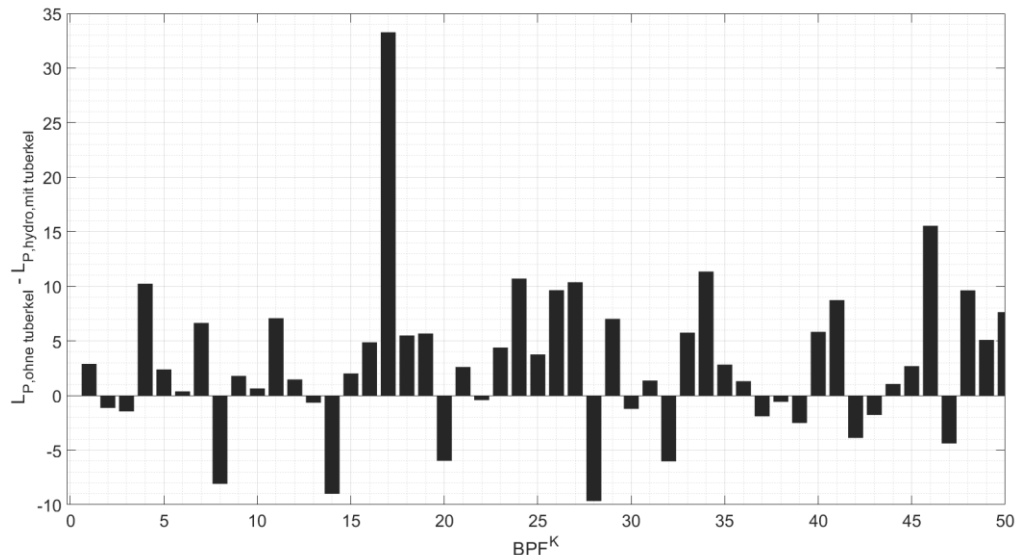


Abb.16 Differenz der Schmalbandordnungsspektren der Hydroschallpegel $L_{P,hydro}$ re 10^{-6} Pa zwischen dem Propellerprofil mit und ohne Tuberkel im Bereich $BPF^1 - BPF^{50}$
Mittlere Differenz = 3.1 dB

Der Abb.16 kann entnommen werden, dass im Bereich $BPF^1 - BPF^{50}$ die Hydroschallabstrahlung des Propellerprofil mit Tuberkel im Mittel um ca. 3 dB niedriger ist als für das Profil ohne Tuberkel. Damit bestätigen sich die bereits auf Basis der numerischen Strömungssimulationen erhaltenen Resultate.

2.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundprojekts OTC-Thruster wurde ab November 2021 ein nabenloses, leises und vibrationsarmes Antriebssystem für autonome Unterwasserfahrzeuge entwickelt und untersucht. Die hydrodynamische Auslegung des Propellerblattprofile erfolgte durch den Lehrstuhl für Strömungsmaschinen der Universität Rostock, während die Entwicklung der Leistungselektronik zur Motoransteuerung durch den Lehrstuhl für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe durchgeführt wurde. Im Jahr 2023 musste sich der deutsche Industriepartner Kraken Power GmbH auf Weisung des kanadischen Mutterkonzern, welcher entschied die Entwicklung von Unterwasser-Antriebssystemen nicht fortzusetzen, aus dem Projekt zurückziehen.

Nach dem Rückzug der Kraken Power GmbH im Jahr 2023 übernahm das Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Universität Hannover die Arbeitspakete für das Design und den Bau des Elektromotors. Weitere ursprünglich extern vorgesehene Aufgaben, unter anderem die Auslegung des hydrodynamischen Gleitlagers, wurden auf die verbleibenden Projektpartner verteilt. Der daraus resultierende zusätzliche Arbeits- und Abstimmungsaufwand machte eine kostenneutrale Projektverlängerung erforderlich.

Im Projektverlauf wurde ein Thruster mit nabenlosen Propeller gemäß den vorgegebenen Leistungs-, Schub- und Einbaurandbedingungen entworfen, gefertigt und im Rahmen experimenteller Untersuchungen erfolgreich getestet. Ein wesentlicher Schritt zur Reduktion hydrodynamisch bedingter hydroakustischer Emissionen durch den Propeller selbst, war die Einführung von Vorderkantentuberkeln an den Propellerblättern. Numerische, skalenauflösende CFD-Simulationen zeigten, dass diese Modifikation zu einer signifikanten Reduktion von Druckfluktuationen an den Blättern und im Nachlauf führt, ohne die hydrodynamische Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen.

Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnten die CFD-Simulationsergebnisse bestätigt werden. Die Hydroschallemissionen durch den Propeller mit Tuberkel-Vorderkante fielen Bereich zwischen $BPF^1 - BPF^{50}$ ca. 3.1 dB niedriger aus als beim Propeller ohne Tuberkel.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Tuberkel-Propellerkonzept eine messbare Reduktion der hydroakustischen Emissionen bewirkt. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung des Projektziels geleistet, ein leises und vibrationsarmes nabenloses Thruster-System für Unterwasseranwendungen zu entwickeln.

Hinsichtlich der entwickelten Leistungselektronik (Frequenzumformer) zur Beschaltung des Elektromotors bleibt festzuhalten, dass die experimentellen Untersuchungen mittels Block-Kommutierung des Motors durchgeführt wurden. Es ist vorgesehen in weiteren Entwicklungsschritten, nach dem Abschluss dieses Projektes, den Frequenzumformer zur Beschaltung Motors mittels Sinus-Kommutierung und dem Einsatz anderer Halbleiterelemente, welche signifikant höhere Schaltfrequenzen erlauben, weiterzuentwickeln. Dies ist innerhalb der Projektlaufzeit, aufgrund der notwendig gewordenen Umstrukturierungen, jedoch nicht mehr realisierbar gewesen. Die mittelfristige Planung für ein gemeinsames Nachfolgeprojekt sieht zu dem die Entwicklungen einer sensorlosen Motorsteuerung vor. Durch den Einsatz einer Sinus-Kommutierung bzw. der Entwicklung einer gänzlich sensorlosen Motorsteuerung kann eine durchgreifende, weitere Verbesserung der hydroakustischen Performance des Thruster-Systems erwartet werden.

2.6 Liste der Veröffentlichungen

- Hieke, M.; Witte, M.; Wurm, F.H.: The Influence Of Leading Edge Tubercle On The Transient Pressure Fluctuations Of A Hubless Propeller. 16th European Turbomachinery Conference Proceedings. March 2025.
- Hieke, M.; Witte, M.; Wurm, F.-H. The Influence of Leading Edge Tubercle on the Transient Pressure Fluctuations of a Hubless Propeller. *Int. J. Turbomach. Propuls. Power* **2026**, *11*, 4. <https://doi.org/10.3390/ijtp11010004>
- Witte, M.; Paszkiewicz, A.; Ospel, M. W.; Rathje, J. T.; Hieke, M. ; Wurm, F.-H. : Design of a hydro sound intensity probe for quantification and localization of acoustic sources — Applied to a hubless marine rim drive. *Ocean Engineering* Volume 267, Jan 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113227>.
- Schubert, M.; Fuhrmann, J.; Hieke, M.; Witte, M.; Eckel, H.-G.: Hydro-Noise Measurements for Pressurizable Underwater Power Converters. 25th European Conference on Power Electronics and Applications EPE, Sep. 2022, <https://doi.org/10.23919/epe23ecceurope58414.2023.10264572>
- Hieke, M.; Sultani, H.; Witte, M.; v. Estorff, O.; Wurm, F.-H.: A workflow for hydroacoustic source analyses based on a scale-resolving flow simulation of a hubless propeller. *Ocean Engineering* Volume 261, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112131>
- Matthias Witte, Niklas Nolte, Jörn Hinnenthal, Frank–Hendrik Wurm.: Hydroacoustic investigations of a marine propeller based on holography. *Ocean Engineering*, Volume 345, 2026, 123231, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123231>

3 Zahlenmäßigen Nachweises: die wichtigsten Positionen

Die wichtigsten Positionen der Kosten sind in der Tabelle 1 dargestellt. Der überwiegende Anteil der Kosten liegt im Bereich des wissenschaftlichen Personals und wissenschaftliche Hilfskräfte. Hinzu kommen Kosten für die Realisierung der für das Projekt notwendigen experimentellen Aufbauten und Prototypenbauteile.

Kostenstelle	Kostenart	Kosten bis Ende 12/25
0812	Personalkosten	271.173,35€
0822	Hilfskräfte	14.132,51 €
0835	Aufträge	9.424,80 €
0850	Investitionen > 800€	23.364,34 €
	Gesamt	318.095,00 €

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Forschungsarbeiten in dem Teilprojekt von OTC-Thruster waren notwendig, um die Ziele, die in der Vorhabensbeschreibung erläutert wurden, zu erreichen. Im Rahmen der Durchgeführten Arbeiten konnte ein vollständiges Thruster-System entwickelt, gebaut und im Rahmen mehrere experimenteller Untersuchungskampagnen erfolgreich getestet werden.

5 Voraussichtlicher Nutzen

Trotz der durch den Ausstieg des Industriepartners Kraken Power GmbH bedingten Herausforderungen und Anpassungen konnten wertvolle Ergebnisse erzielt werden. Die verschiedenen Iterationen in der Entwicklung des Thruster Gesamtsystems und insbesondere bei der Entwicklung der Propellerprofile führten nicht nur zu technischen Fortschritten, sondern auch zu einem signifikanten Lerneffekt für die am Projekt beteiligten Mitarbeiter und wissenschaftlichen Hilfskräfte.

Das innerhalb des Projekts entwickelte Thruster-System bieten eine solide Grundlage für zukünftige Forschung und bei fortgesetzter Weiterentwicklung auch das Potential zum Einsatz bei realen maritimen, hydroakustisch kritischen Anwendungen.

Insgesamt diente das OTC-Thruster-Projekt als wertvolle Ausbildungsplattform für mehrere Bachelor- und Masterarbeiten. Studierende konnten im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten an praktischen Fragestellungen des Projektes arbeiten. Die Themeninhalte wurden darüber hinaus in die Mastervorlesung „Grundlagen der Akustik“ eingearbeitet, so dass eine große Anzahl an Studierenden mit den aktuellen Forschungsfragen dieses Projektes und den eingesetzten Methoden vertraut gemacht wurden.

Insgesamt konnten über den Projektverlauf 6 Publikationen mit Qualitätssicherung (peer review) realisiert werden, die entweder direkt oder indirekt mit dem Projekt in Verbindung stehen.

Zusammengefasst hat dieses Projekt die Kompetenzen des ITU auf dem Gebiet der Hydroakustik sowie im Bereich der Entwicklung von Schiffspropellern erheblich gestärkt und damit das Fundament für die zukünftigen Einwerbung von Drittmitteln gelegt.

Die intensive Zusammenarbeit zwischen LEA und ITU hat hierbei bereits zu einem weiteren Förderprojekt geführt:

- LARoRoll: „Minimierung der Lärmwirkungen des RoRo-Umschlages“ - Lärmarmer RoRo-Umschlag: FKZ: 19H23004B

Eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse dieses Projektes ist durch die Universität Rostock nicht geplant.

6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung sind keine Fortschritte auf dem bearbeiteten Gebiet durch andere Stellen bekannt geworden.