



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

DST - Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

**Verifizierung der Optimierung und der Energieeffizienz von
Propulsionsanlagen von Schiffen unter Betriebsbedingungen
(VeriProp)**

Bericht 2123

Juli 2014

AiF-Forschungsvorhaben Nr. 17097 N

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Verifizierung der Optimierung und der Energieeffizienz von Propulsionsanlagen von Schiffen unter Betriebsbedingungen (VeriProp)

der Forschungsstelle(n)

DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg

Das IGF-Vorhaben 17097 N der Forschungsvereinigung Schiffstechnik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Duisburg, 14.07.2014

Ort, Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Zöllner'.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Thomas Guesnet'.

Dipl.-Ing. J. Zöllner / Dipl.-Ing. Thomas Guesnet

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	2
2. Einführung und Aufgabenstellung	3
3. Entwurfsgrundlagen für Propulsionsanlagen.....	5
3.1. Verwendung von Modellversuchsergebnissen	6
3.2. Auswahl der Schiffe für Großversuche und CFD-Berechnungen	8
4. CFD-Berechnungen	12
4.1. Einführung	12
4.2. Lösungsweg	13
4.3. Berechnungsfälle	19
4.4. Numerische Propulsionsversuche im Modellmaßstab	31
4.5. Numerische Propulsionsversuche für die Großausführung der Schiffe	38
4.6. Zusammenfassung CFD-Modellierung Propulsionsversuch	42
5. Messgerät für Schub und Drehmoment in der Großausführung	44
5.1. Entwicklungsschritte	45
6. Großversuche	49
6.1. Großversuche mit dem FGS „Loreley Elegance“	49
6.2. Großversuche mit dem TMS „EVENTUS“	58
6.3. Bewertung der Großversuche	67
7. Diskussion und Ausblick	68
7.1. Ergebnistransfer	69
Literaturverzeichnis	72
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	73

1. Zusammenfassung

Die Propulsionsanlage spielt eine entscheidende Rolle, wenn ein Schiffsentwurf oder ein bereits existierendes Schiff in Bezug auf die Energie- und Kosteneffizienz optimiert werden soll. Insbesondere im Bereich der Binnenschiffe liegt der energetische Wirkungsgrad der Propulsionsanlage relativ niedrig, weil die Propeller im Durchmesser eingeschränkt sind. Hier ist es deshalb besonders wichtig, für das Schiff und seinen Einsatzfall eine optimal ausgelegte Anlage zu entwerfen.

Insbesondere bei Binnenschiffen ist die richtige Auslegung der Propulsionsanlage dabei besonders schwierig:

- Die Schub- und Drehmomentkennwerte für eine begrenzte Auswahl an Kombinationen von Propellertypen und Düsenprofilen stehen in der Literatur zur Verfügung, allerdings nicht in beliebiger Kombination und nur begrenzt für neu entwickelte Bauformen von Propellern und Düsen.
- Wichtige Entwurfparameter, wie zum Beispiel die Nachstromziffer, können aufgrund nicht durchgeführter Modellversuche auch nicht direkt bestimmt werden, sondern werden mit Erfahrungswerten abgeschätzt.
- Berechnungen mit CFD-Methoden sind bei Binnenschiffen besonders aufwendig und bilden jeweils nur einen Punkt im Feld der verschiedenen Einsatzbedingungen des Schiffes ab.
- Der Abgleich der Berechnungsergebnisse aus Modellversuchen oder aus CFD-Berechnungen mit den Ergebnissen des Schiffsbetriebs wurde bisher nur in Ausnahmefällen durchgeführt.

VeriProp hat hier neue Erkenntnisse ermöglicht, weil CFD-Berechnungen in einem bisher nicht durchgeführten Detailierungsgrad bis hin zum numerischen Propulsionsversuch vorgelegt werden. Zusätzlich wurden erstmals bei Binnenschiffen unter Betriebsbedingungen Messungen des Propellerschubs im Großversuch durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben Nr. 17097 N der Forschungsvereinigung Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Oststr. 77, 47057 Duisburg, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

2. Einführung und Aufgabenstellung

Die Propulsionsanlage spielt eine entscheidende Rolle, wenn ein Schiffsentwurf oder ein bereits existierendes Schiff in Bezug auf die Energie- und Kosteneffizienz optimiert werden soll. Insbesondere im Bereich der Binnenschiffe liegt der energetische Wirkungsgrad der Propulsionsanlage relativ niedrig, weil die Propeller im Durchmesser eingeschränkt sind. Hier ist es deshalb besonders wichtig, für das Schiff und seinen Einsatzfall eine optimal ausgelegte Anlage zu entwerfen. Die Entwurfsgrundlagen für diese Propulsionsanlagen beruhen auf publizierten Kennwerten für den Schub und das Drehmoment des Propellers, die mit der Methode von systematischen Modellversuchen ermittelt worden sind. Mit Hilfe dieser Kennwerte muss der Propellerhersteller die Propulsionsanlagen auslegen und optimieren, das heißt, den richtigen Propellertyp und das geeignete Düsenprofil auswählen und den Propeller in Bezug auf seine Geometrie und Steigung richtig auslegen. Methoden der numerischen Strömungsberechnungen werden bisher für die Auslegung dieser Propulsionsanlagen in der Praxis noch nicht eingesetzt.

Insbesondere bei Binnenschiffen ist die Auslegung der Propulsionsanlage dabei besonders schwierig:

- Die Schub- und Drehmomentkennwerte für eine begrenzte Auswahl an Kombinationen von Propellertypen und Düsenprofilen stehen in der Literatur zur Verfügung, allerdings nicht in beliebiger Kombination und nur begrenzt für neu entwickelte Bauformen von Propellern und Düsen.
- Die Ergebnisse von älteren Versuchsserien und von neueren Untersuchungen sind nicht immer vergleichbar, d.h., es bestehen in einigen Bereichen Unterschiede, die bisher nicht plausibel erklärt wurden.
- Wichtige Entwurfsparameter, wie zum Beispiel die Nachstromziffer, können aufgrund nicht durchgeführter Modellversuche auch nicht direkt bestimmt werden, sondern werden mit Erfahrungswerten abgeschätzt.
- Schließlich besteht eine weitere Schwierigkeit darin, dass der Abgleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen des Schiffsbetriebs bisher nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden kann und nicht vollständig ist. Nur die Messung des Drehmoments auf der Propellerwelle und damit die Bestimmung der Leistung wird gelegentlich durchgeführt, die direkte Bestimmung des Propellerschubes ist insbesondere im Fall der Binnenschiffe unter Praxisbedingungen bisher nicht möglich.

Aus diesen Gründen bleibt der Entwurf von hoch belasteten Propulsionsanlagen für die Binnenschifffahrt eine schwierige Aufgabe. Wenn beispielsweise ein Schiff die projizierte Geschwindigkeit nicht erreicht, kann nicht direkt ermittelt werden, ob dies durch einen zu geringen Schub des Propellers oder durch einen unerwartet hohen Widerstand des Schiffes verursacht wird.

Erst wenn es unter Betriebsbedingungen möglich ist, auf der Propellerwelle den Schub und das Drehmoment zusammen mit der Drehzahl zu messen, wird es möglich sein, die

Energieeffizienz des Propellers zu bestimmen, ein Verbesserungspotential zu identifizieren und auch die Entwurfparameter für den Propeller zu verifizieren.

Im Rahmen des Vorhabens VeriProp sollen zur Verbesserung der Entwurfsgrundlagen Messgeräte zur Schub- und Leistungsmessung von Propellern im realen Schiffbetrieb entwickelt, gebaut und eingesetzt werden. Die dabei gewonnenen Messwerte sollen mit den Kennwerten aus Modellversuchen korreliert werden, insofern eine passende Datenbasis zur Verfügung steht. So soll es möglich werden, die richtige Auslegung der Propeller unter Praxisbedingungen zu überprüfen und die Energieeffizienz der Schiffsantriebe durch Messungen an Bord zu bestimmen.

Mit den Ergebnissen des Vorhabens sollen die Möglichkeiten geschaffen bzw. verbessert werden, die Propulsionsanlagen von neuen Schiffen optimal auszulegen und die Ergebnisse in der Praxis zu verifizieren. Auch soll es möglich werden, Propulsionsanlagen von älteren Schiffen gezielt zu modernisieren und im Wirkungsgrad anzuheben.

3. Entwurfsgrundlagen für Propulsionsanlagen

Für eine große Anzahl von Binnenschiffen wird der Propeller unter Bezugnahme auf wenige Vorgaben entworfen, diese sind:

- Propellerdurchmesser D_P : Er liegt im Schiffentwurf bereits frühzeitig fest, denn er ergibt sich aus dem gewählten Schiffstyp und dem gewünschten Tiefgang für das Schiff ohne Ladung oder mit minimaler Ladung.
- Motorleistung P_B : Die Auswahl an Motoren ist zurzeit stark eingeschränkt, da nur wenige Motoren die Anforderungen an Emissionsgrenzen erfüllen und die entsprechenden Zertifikate aufweisen. Deshalb sind oft im ersten Stadium des Entwurfs der Motortyp und damit die Motorleistung und die Motordrehzahl bereits festgelegt.
- Propellerdrehzahl n : Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Auswahl an Untersetzungsgetrieben und einfachen Kennwerten (z.B. für eine maximale Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitze) ist der Bereich der Propellerdrehzahl stark begrenzt.

Mit der Vorgabe von Propellerdurchmesser, Leistung und Drehzahl sind die wesentlichen Parameter für den Propeller früh festgelegt. Es verbleiben dem Entwerfer des Propellers noch einige wenige Freiheitsgrade zur Bestimmung des optimalen Propellers:

- Abschätzung der Nachstromziffer aus Erfahrungswerten oder unter Bezugnahme auf ähnliche Schiffe.
- Auswahl des Propellertyps („Wageningen“, „Skew“ oder „Kaplan“ etc.) und der Anzahl der Propellerflügel und der -fläche.
- Auswahl der Düse, falls erforderlich.
- Als wichtigste Stellgröße bleibt die Bestimmung der Steigung des Propellers.

Als Entwurfsgrundlage dienen hier zum Beispiel die veröffentlichten Kennlinien aus [1] „The Wageningen B-screw series“ oder als aktuellere Quelle, „Wake adapted Ducted Propellers“ [2] und die „Untersuchung einer Serie von Düsen-Skew-Propellern mit hoher Flügelzahl (Meyne-VBD-Serie)“ [3]. Oft liegen jedoch für die bevorzugte Kombination aus Propeller und Düse keine spezifisch ermittelten Kennlinien vor.

Die Entwurfsgrundlagen verbessern sich deutlich, wenn ein Modellversuch durchgeführt wird, denn dann lässt sich aus den Ergebnissen sowohl eine Nachstromziffer w als auch der erforderliche Propellerschub T ermitteln. Falls auch der Widerstandsversuch durchgeführt wurde, erhält man für den getesteten Zustand auch die Sogziffer t , siehe auch Abschnitt 4.1.

3.1. Verwendung von Modellversuchsergebnissen

Insbesondere bei den hier betrachteten Binnenschiffen fällt auf, dass es eine Vielzahl von Schiffstypen gibt, die sich im Hinblick auf die Propulsionsanlage grundlegend unterscheiden.

Name	Länge L m	Breite B m	Tiefgang T m	Propeller- Durchmesser DP m	Anzahl Propeller	Düse
Binnenschiff 1	85.00	9.00	2.50	1.47	1	vorhanden
Binnenschiff 2	80.00	11.37	3.70	2.00	1	vorhanden
Binnenschiff 3	110.00	11.40	3.20	1.72	2	vorhanden
Binnenschiff 4	110.00	11.40	3.20	1.72	1	vorhanden
Schubboot	40.00	14.93	2.00	2.10	3	vorhanden
Binnen-Fahrgastschiff	77.27	11.62	2.10	1.92	2	nicht vorhanden

Tabelle 1: Daten zu unterschiedlichen Binnenschiffen

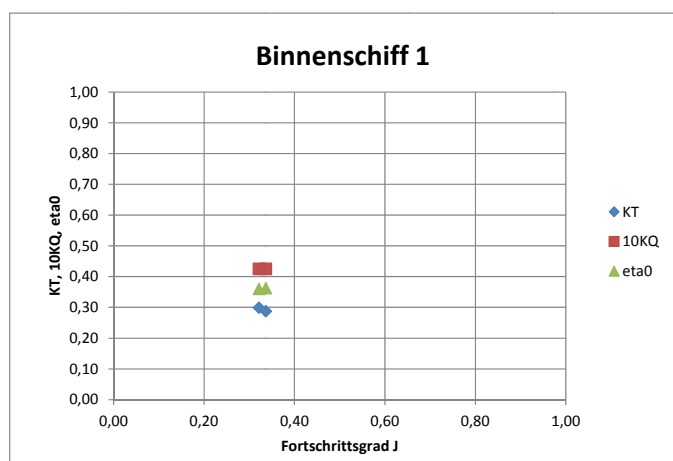
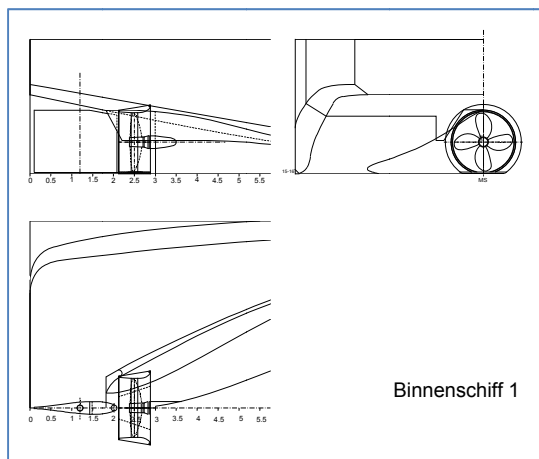


Abbildung 1: Binnenschiff 1 / Skizze Hinterschiff (links) und Ergebnisse eines Modellversuchs (rechts)

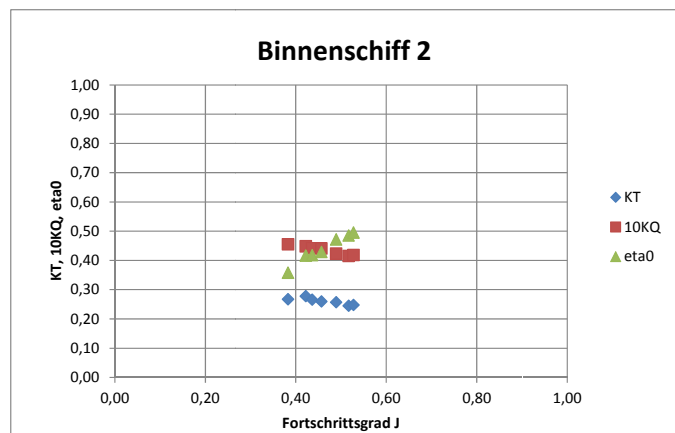
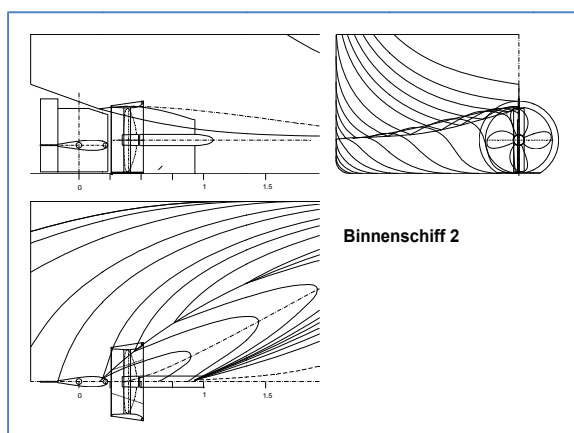


Abbildung 2: Binnenschiff 2 / Skizze Hinterschiff (links) und Ergebnisse eines Modellversuchs (rechts)

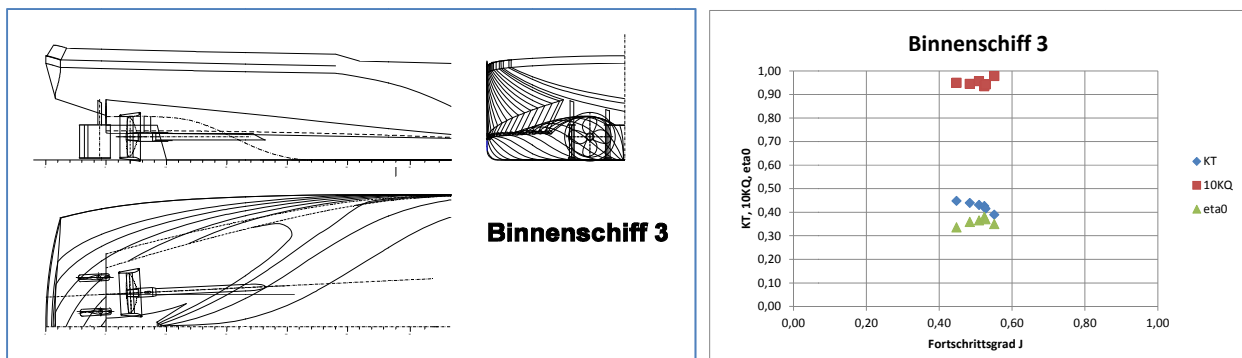


Abbildung 3: Binnenschiff 3 / Skizze Hinterschiff (oben) und Ergebnisse eines Modellversuchs (unten)

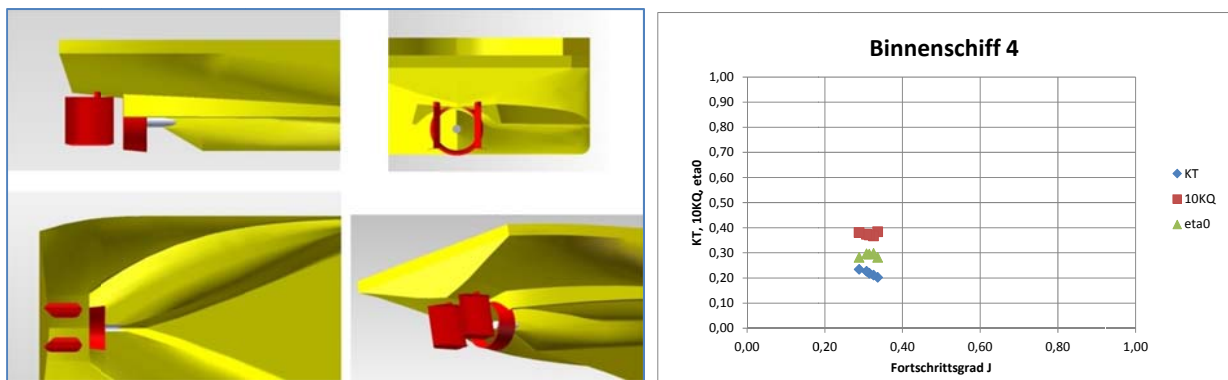


Abbildung 4: Binnenschiff 4 / Skizze Hinterschiff (links) und Ergebnisse eines Modellversuchs (rechts)

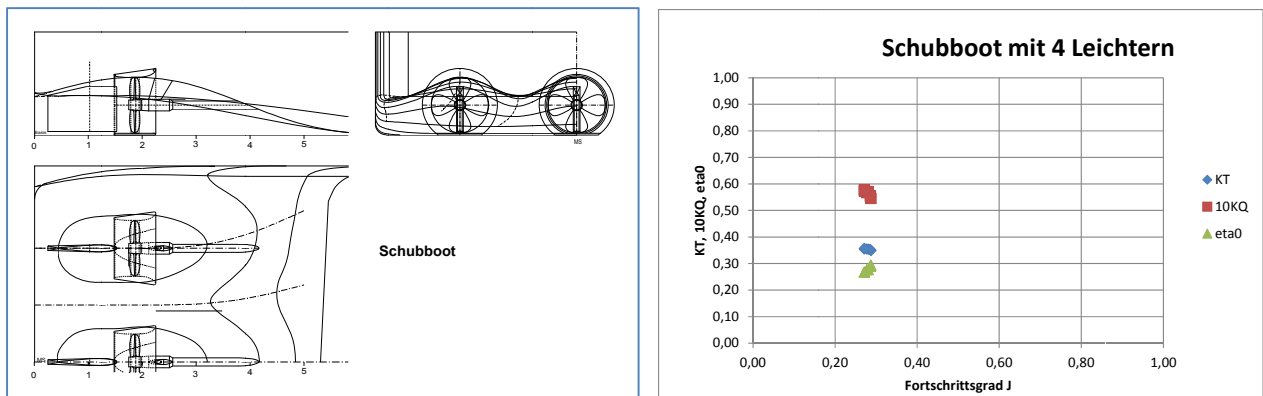


Abbildung 5: Binnenschiff 5 / Skizze Hinterschiff (links) und Ergebnisse eines Modellversuchs (rechts)

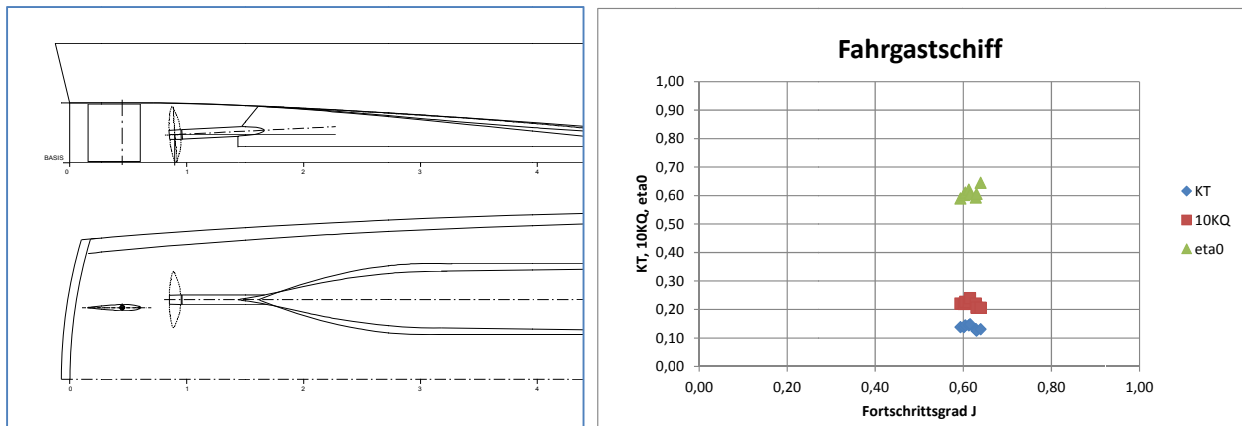


Abbildung 6: Binnenschiff 6 / Skizze Hinterschiff (links) und Ergebnisse eines Modellversuchs (rechts)

Die in Abb. 1 bis 6 dargestellten Formen der Hinterschiffe und der Ergebnisse eines Propulsions-Modellversuchs lassen erkennen, dass im Rahmen des Vorhabens nur ein kleiner Teil der unterschiedlichen Schiffstypen betrachtet werden kann. Auch aus den Gründen, die mit der Auswahl der Schiffe für die Großversuche in Zusammenhang stehen, fokussiert sich die Untersuchung deshalb auf das Binnenschiff mit einem Propeller in Düse (Abb. 4) und dem Fahrgastschiff mit 2 Propellern (Abb. 6).

3.2. Auswahl der Schiffe für Großversuche und CFD-Berechnungen

Bei den Großversuchen war die Einbindung der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PBA) von großer Wichtigkeit. Relativ früh kam aus diesem Kreis der Hinweis, dass für die Großversuche auch ein Schiff verwendet werden sollte, das nicht mit einem ummantelten Propeller ausgestattet ist. Die Kombination von Propeller und Düse ist in der Binnenschifffahrt weit verbreitet. Damit würde sich aber das Problem stellen, dass der Schub des Schiffes aus zwei Komponenten zusammengesetzt ist – dem Schub der Düse und dem Schub des Propellers – und nur die Komponente des Propellerschubes eine Messung zulässt. Aus der Messung des Propellerschubes könnte man demnach keine Rückschlüsse auf den insgesamt einwirkenden Schub ziehen. Aus diesem Grund wurde versucht, zunächst ein Schiff ausfindig zu machen, das mit einem Propeller ohne Düse ausgestattet ist. Typischerweise sind das die Fahrgastschiffe, die eine relativ kleine Verdrängung aufweisen und in einem hohen Geschwindigkeitsbereich eingesetzt werden.

Das Fahrgastschiff (FGS) „Loreley Elegance“ stellte sich in diesem Zusammenhang als besonders gut geeignet heraus:

- Der Durchmesser der Propellerwelle ist relativ klein, so dass vergleichsweise hohe Schubspannungen in der Propellerwelle zu erwarten sind.
- Das Schiff wurde von der Lux-Werft geplant und gebaut. Die Werft beteiligt sich im Rahmen des PBA am Projekt VeriProp und kann die Messungen technisch unterstützen.

- Das Schiff ist mit einem Propeller der Firma PROMARIN ausgerüstet. Auch PROMARIN beteiligt sich im Rahmen des PBA am Projekt VeriProp und kann genaue Unterlagen und Berechnungen zu den verwendeten Propellern bereitstellen.
- Bei einer Ortsbesichtigung zeigte sich die gute Zugänglichkeit der Propellerwelle. Im Bereich zwischen der Stopfbuchse und dem Drucklager am Getriebe besteht ausreichend Platz für die Montage der Messeinrichtung.



Abbildung 7: FGS „Loreley Elegance“

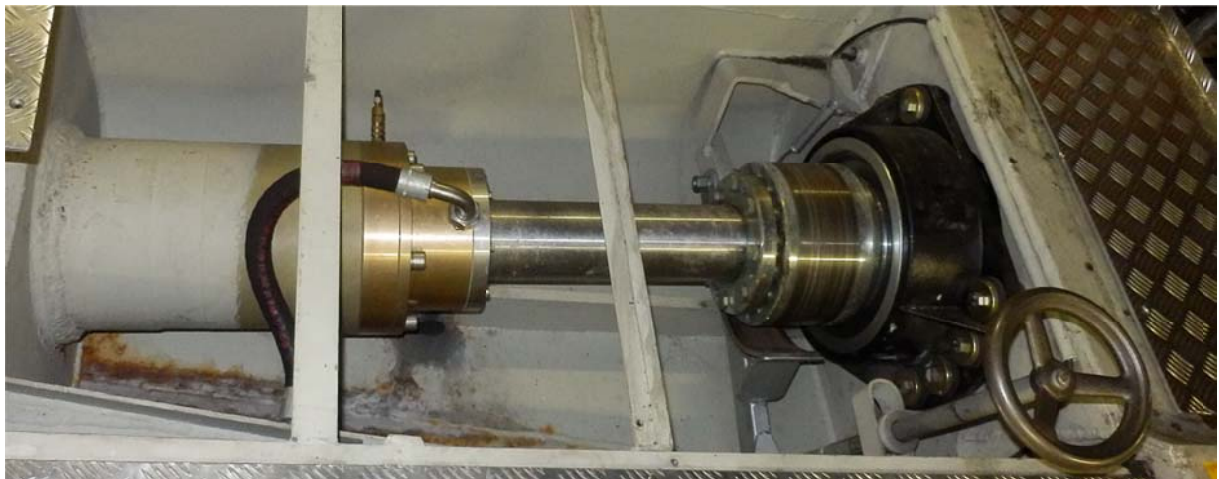


Abbildung 8: Propellerwelle mit Stopfbuchse (links) und Drucklage (rechts)

Als zweites Schiff für die Großversuche wurde das Binnentankschiff (TMS) „EVENTUS“ ausgewählt:

- Auch hier zeigte sich bei einer Ortsbesichtigung die gute Zugänglichkeit der Propellerwelle.
- PROMARIN hatte auch hier den Propeller entworfen und hergestellt
- Für diesen Schiffsentwurf waren beim DST Modellversuche durchgeführt worden.



Abbildung 9: TMS „EVENTUS“ nach dem Stapellauf im Jahr 2010



Abbildung 10: Propellerwelle mit Wellenbremse (links) und Drucklager (rechts)

Die technischen Daten der untersuchten Schiffe werden in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Daten der Schiffe für die Großversuche		FGS	TMS
		Loreley Elegance	EVENTUS
Länge	L [m]	60.00	110.00
Breite	B [m]	11.20	11.45
Nenntiefgang	T [m]	1.50	3.20
Tiefgang im Versuch	T [m]	1.50	2.10
Wassertiefe im Versuch	h [m]	ca. 5.00	ca. 5.50
Anzahl Propeller		2	1
Durchmesser Propeller	D_P [mm]	1150	1800
Anzahl Flügel		5	5
Steigungsverhältnis	P/D_P	1.03	1.22
Flächenverhältnis	A/A_0	0.95	1.05
Propellerdüse		nicht vorhanden	vorhanden
Leistung je Propeller	P [kW]	478	1343

Tabelle 2: Technische Daten der untersuchten Schiffe

Nachdem die Auswahl für die Schiffe getroffen war, konnten sich auch die nachfolgenden Arbeiten im CFD-Bereich auf diese Schiffstypen fokussieren.

4. CFD-Berechnungen

4.1. Einführung

Um eine Propulsionsanlage optimal auszulegen, sind Informationen über die Strömungsverhältnisse am Hinterschiff, insbesondere die Zuströmung zum Propulsionsorgan, von wesentlicher Bedeutung.

Eine getrennte Optimierung der Einzelkomponenten Schiff und Propeller ist möglich, wird aber auf Grund der vorhandenen Wechselwirkungen zwischen Schiffsrumpf und Propeller nicht zum gewünschten Optimum führen.

Am System Schiff-Propeller sind zwei wesentliche Wechselwirkungen zu beobachten. Das ist zum einen die durch die Verdrängung des Schiffes verursachte Geschwindigkeitsreduzierung der Anströmung zum Propeller. Diese wird als Nachstrom bezeichnet.

$$w = 1 - \frac{V_A}{V_S}$$

Zum anderen führt die Wirkung des Propellers zu Veränderungen der Druckverhältnisse auf der Schiffsaußenhaut und damit verbunden auch zu einer Veränderung des Widerstandes des angetriebenen Fahrzeuges. In den meisten Fällen erfolgt durch den Propeller eine Beschleunigung des Wassers vor dem Propeller, die zu einer Reduzierung des Druckes am Schiffskörper und dementsprechend auch zu einer Widerstandserhöhung führt. Diese Widerstandsveränderungen werden in der Sogziffer zusammengefasst.

$$t = 1 - \frac{R_T}{T}$$

Auf der Basis des prognostizierten Widerstandes und dem Nachstromfeld eines Schiffes werden Schiffsschrauben durch den Propellerhersteller entworfen. Aus den oben beschriebenen Wechselwirkungen ergibt sich, dass der im Widerstandsversuch ermittelte Gesamtwiderstand des Schiffes nicht identisch ist mit dem Schub des Propellers, welcher notwendig ist, um das Schiff mit der Geschwindigkeit aus dem Widerstandsversuch zu bewegen.

Eine Überprüfung der Effizienz einer Propulsionsanlage ist nur im Propulsionsversuch möglich. Idealerweise sollte dieser Propulsionsversuch mit der für das System Schiff-Propeller entworfenen Schiffsschraube in der Großausführung (oder als Mindestforderung im Modellversuch mit einem kleinen Maßstab) durchgeführt werden. Natürlich ist die Forderung bezüglich des Maßstabes im Entwurfsprozess wirtschaftlich nicht vertretbar.

Bei Seeschiffsmodellen werden Modell-Propulsionsversuche immer häufiger mit dem für das Projekt entworfenen Modellpropeller realisiert. Ziel ist es, das finale System Schiff-Propeller auf seine Effizienz unter Berücksichtigung der auftretenden Wechselwirkungen zu überprüfen.

In der Binnenschifffahrt ist diese sinnvolle Vorgehensweise auf Grund der finanziellen Projektgrößen ökonomisch kaum durchsetzbar. Aus diesem Grund muss nach wirtschaft-

lichen Alternativen gesucht werden, die Wechselwirkungen zwischen Schiff und Propeller möglichst realistisch für den Entwurfsprozess nachzubilden.

Numerische Methoden zur Berechnung der Umströmung von Schiffen haben sich in den letzten Jahren zum Standardwerkzeug im Entwurfsprozess des Schiffes entwickelt. Die Anzahl der notwendigen Modellversuche bis zum optimalen Schiffentwurf konnte dadurch reduziert werden. Ein wesentlicher Anteil der Optimierungsschritte kann durch numerische Berechnungen realisiert werden, deren Ergebnisse eine Vielzahl von Informationen über das Strömungsfeld liefern, die mit Modellversuchen nur sehr aufwendig ermittelt werden können.

Trotz dieser Fortschritte sind Modellversuche noch nicht ersetzbar. Sie liefern die Bestätigung, dass die Entwurfsziele erreicht wurden. Grund dafür ist die teilweise noch vorhandene Unsicherheit bei der Genauigkeit der Berechnungen der integralen Größen, wie den Widerstand des Schiffes oder den Schub und das Drehmoment am Propeller.

Für CFD-Simulationen muss das reale Strömungsproblem durch endlich viele Punkte im definierten Berechnungsraum und durch Randbedingungen beschrieben werden. Die Anzahl der Raumpunkte hat einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnungszeit und auf den genutzten Speicher der Rechenanlagen. Durch die Weiterentwicklung der Rechnerkapazitäten ist es möglich geworden, verfeinerte Berechnungsgitter (größere Anzahl von Berechnungspunkten) zu nutzen, die bei vielen Problemstellungen auch zu einer besseren Annäherung des Ergebnisses an die exakte Lösung führen.

Im Rahmen des Projektes sollen geeignete Verfahren zur Realisierung der Wirkung des Propellers hinter dem Schiff gefunden werden und deren Einsetzbarkeit im Propulsionsversuch für das Modell und die Großausführung überprüft werden. Für die zwei ausgewählten Binnenschiffe (siehe Abschnitt 3.2 auf Seite 8ff) werden numerische Berechnungen bei definierten Betriebszuständen im Modellmaßstab und in der Großausführung ausgeführt.

4.2. Lösungsweg

Verfahren

Die für die Auslegung der Propulsionsanlage zu betrachtende Wechselwirkung zwischen Schiff und Propeller konzentriert sich bei Standardschiffen im Normalfall auf das Heck des Schiffes. Viskose Effekte haben am Hinterschiff einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung des Strömungsfeldes vor dem Propeller. Um diese Effekte zu erfassen, wird für die Berechnung das Programmpaket ANSYS CFX eingesetzt, welches die Berechnung der inkompressiblen, reibungsbehafteten und turbulenten Strömung ermöglicht. Bei dieser Software handelt es sich um einen sogenannten RANSE-Löser (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations), der die Bewegungen des Fluids im Berechnungsraum mit den Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls beschreibt. Das Verfahren simuliert die Wirkung der Turbulenz auf das Fluid durch ein sogenanntes Turbulenzmodell. Im Rah-

men dieses Projektes wurde das $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell eingesetzt [4]. Durch den angewandten Löser werden die Erhaltungsgleichungen nach der Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Ausführlich werden die angewandten Methoden in [5] beschrieben.

Für die Durchführung von numerischen Propulsionsversuchen muss die Wirkung des Propellers als Antriebsorgan modelliert werden. Das ist durch unterschiedliche Ansätze zu realisieren.

Eine einfache und effektive Methode ist das sogenannte Kraft-Scheiben-Modell (KSM). Dieses Modell wird im DST erfolgreich für die Simulation der Propellerwirkung eingesetzt. Es basiert auf der Implementierung von Volumenkräften, die aus vorgegebenen Werten für den Schub und das Drehmoment des Propellers berechnet werden. Die radiale Verteilung der axialen und tangentialen Kräfte in der Propellerebene wird durch Funktionen, die die lokale Verteilung der am Propeller induzierten Kräfte möglichst genau abbilden sollen, zugeordnet [6].

Für den Propulsionsversuch muss bei diesem Verfahren die Freifahrtkurve des verwendeten Propellers bekannt sein, so dass die zum Vortrieb des Schiffes mit einer definierten Geschwindigkeit benötigten Kräfte und Momente entweder iterativ in der Propellerebene implementiert werden können, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den Größen Propellerschub und Widerstand und dem Drehmoment bei einer gewählten Drehzahl einstellt, oder durch die Auswahl geeigneter Betriebspunkte mit anschließender Interpolation der Drehzahl, bei der die Restkraft am System Propeller-Schiff zu Null wird. Eine Diskretisierung der Propellergeometrie ist nicht notwendig, da nur die Wirkung des Propellers durch vorgegebene Volumenkräfte in einer Propellerscheibe mit dem Radius und der Tiefe des Propellers modelliert wird.

Eine komfortablere Methode ist die Berechnung der realen Propellergeometrie hinter dem Schiffskörper. Bei dieser Methode wird das Rechengebiet in ein feststehendes Lösungsgebiet (Schiff, Fernfeld) und in einen rotierenden Bereich (Propeller) unterteilt. Die Flügelstellung des implementierten Propellers ändert sich nicht. In ANSYS CFX wird dieses Verfahren als Frozen Rotor [5] bezeichnet. Es wird ein quasistationärer Zustand berechnet, der die transienten Effekte nicht berücksichtigt. Die Drehung des Propellers wird durch ein rotierendes Koordinatensystem mathematisch innerhalb des RANSE-Lösers berücksichtigt. S. B. Müller hat in seiner Dissertation gezeigt, dass die numerische Berechnung der am frei fahrenden Propeller wirkenden Kräfte für Modell und Großausführung mit hinreichender Genauigkeit möglich ist [7]. Für eine erfolgreiche Anwendung dieser Methode im Rahmen dieses Projektes ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Flügelstellung auf die Kräfte und Momente am im Nachstromfeld des Schiffes angeordneten Propeller hat.

Randbedingungen

Beim Finite-Volumen-Verfahren muss die physikalische Problemstellung in ein endliches Lösungsgebiet (Abbildung 11), welches mit diskreten Volumenelementen gefüllt ist, überführt werden. Es müssen Begrenzungen definiert werden, an denen Randbedingungen

vorgegeben werden, die die Physik hinreichend beschreiben. Die Ränder, durch welche die Unendlichkeit reduziert wird, müssen so gelegt werden, dass sie die Lösung nicht beeinflussen. Da es sich bei dem Fahrgastschiff um einen Zweischauber handelt, konnte hier die Symmetrie ausgenutzt werden (Abbildung 11).

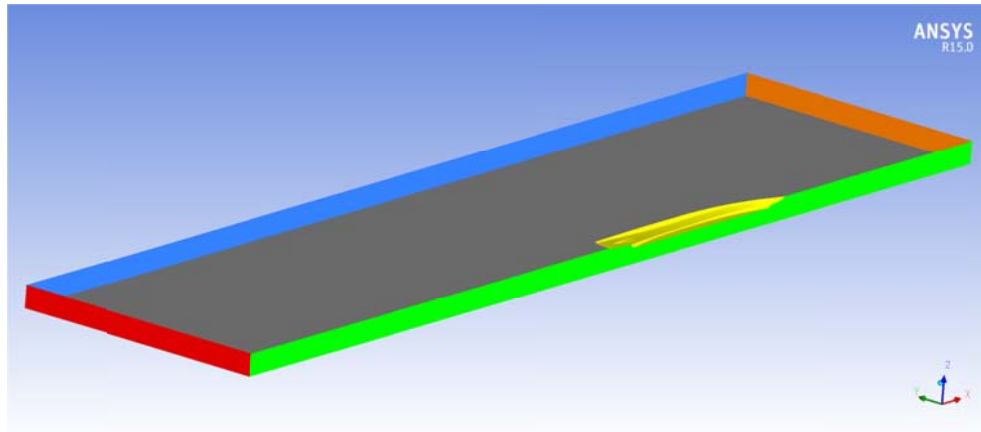


Abbildung 11: Lösungsgebiet Fahrgastschiff

Die angewandten Randbedingungen werden im Folgenden kurz beschrieben und gelten für alle durchgeführten Berechnungen:

- INLET (orange)

Am Einströmrand wird die Schiffsgeschwindigkeit homogen verteilt vorgegeben.

- OUTLET (rot)

Die stromabwärts senkrecht zur Mittelängsachse liegende Fläche wird als Ausströmrand definiert. Die Änderung des Druckes wird an dieser Fläche zu Null gesetzt. Die hier verwendete OPENING-Randbedingung ermöglicht ein ungehindertes Ein- bzw. Ausströmen des Fluids.

- SCHIFF (gelb)

Das Fahrgastschiff bzw. der Tanker werden als reibungsbehaftete Wände definiert, an denen die Haftbedingung erfüllt ist (WALL NO SLIP). Diese Randbedingung gilt auch für alle Anhänge, die in die Berechnung integriert sind.

- WAND (blau)

Die seitliche Begrenzung des Lösungsgebietes wird als reibungsfreie Wand definiert. Es werden Geschwindigkeiten direkt auf der Wand und parallel zur Wand zugelassen. Dadurch wird die seitliche Begrenzung als unendlich definiert.

- BODEN (grau)

Der Gewässerboden wird als reibungsbehaftete Wand definiert, an der die Haftbedingung erfüllt ist (WALL NO SLIP). Um die Relativgeschwindigkeit zwischen Schiff und Gewässerboden zu realisieren, wird diese Wand als bewegte Wand mit Schiffsgeschwindigkeit definiert.

- TOP

Die obere Begrenzung des Lösungsgebietes wird als reibungsfreie Wand definiert, die die nicht verformte Wasseroberfläche repräsentieren soll.

- SYM (grün)

An der so definierten Fläche treten keine Geschwindigkeiten normal zur Wand auf und die Gradienten aller Variablen sind Null.

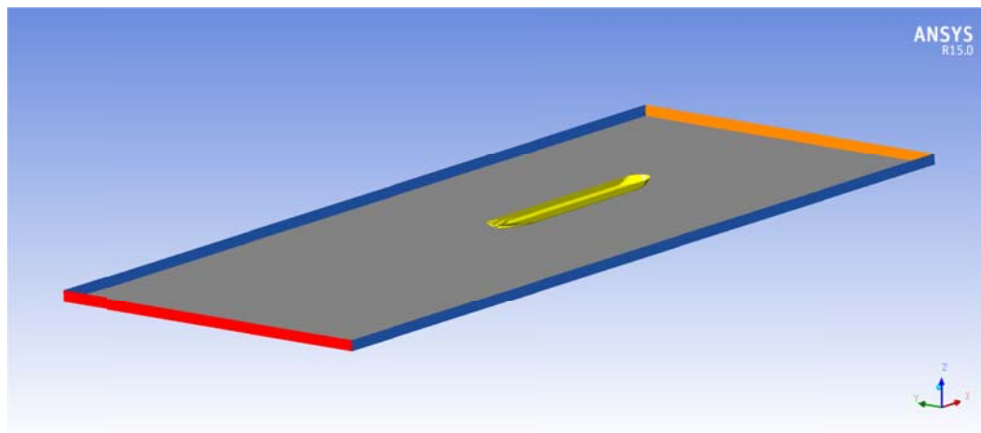


Abbildung 12: Lösungsgebiet Tanker

In der Abbildung 12 ist das Lösungsgebiet des Binnentankschiffes schematisch dargestellt. Da es sich um ein Einschraubenschiff handelt, konnte die Symmetrie hier nicht genutzt werden.

Gittergenerierung

Die Gittergenerierung für alle Berechnungsfälle erfolgte mit den Programmpaketen ANSYS IcemCFD und Tgrid. Für beide Schiffsmodelle wurden die Berechnungsgebiete in 3 Teilgitter unterteilt.

- Fernbereich Wasser
- Nahbereich um das Schiff
- Propeller bzw. KSM¹

Der Fernbereich wurde mit Hexaederelementen gefüllt. Hexaeder sind sehr effizient hinsichtlich der Realisierung einer geringen Zellanzahl bei flachen weit ausgedehnten Lösungsgebieten.

¹ Kraft-Scheiben-Modell

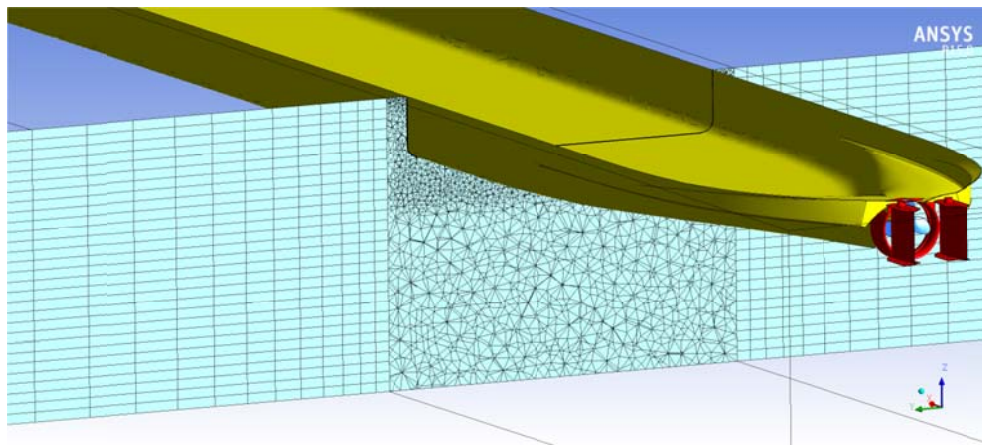


Abbildung 13: Gitterkopplung Nah- und Fernfeld in einer Ebene X

Im Nahbereich um das Schiff und für den realen Propeller wurden Tetraederelemente in Verbindung mit Prismenschichten zur Auflösung der Grenzschicht an den Wänden gewählt (Abbildung 13).

Vorteil dieser Vernetzung ist der geringe zeitliche Aufwand bei der Vernetzung komplexer Geometrien. In der Abbildung 14 sind die Gitter des Propellers und des KSM dargestellt.

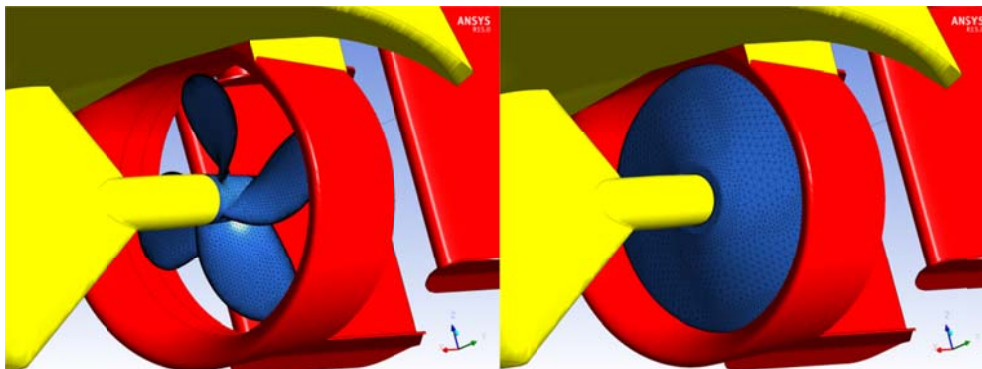


Abbildung 14: Propeller und KSM am Binnentankschiff

Die Kopplung aller Teilgitter erfolgt mit General Grid Interfaces (GGI), bei denen die Feldgrößen über die benachbarten Knoten interpoliert werden. Für die Kopplung des rotierenden Bereiches mit dem Propeller wurde an den Schnittstellen die Verteilung und Anzahl der Knoten in beiden Teilgittern sehr ähnlich gewählt.

Die Erstellung von Gittern für Propeller ist eine anspruchsvolle Aufgabe, insbesondere wenn die Generierung der Flächen- und Volumenelemente blockstrukturiert erfolgt. Um den Aufwand zur Erstellung des Volumengitters zu reduzieren, werden in diesem Projekt alle Propeller mit Tetraederelementen und Prismenschichten auf den Wänden realisiert (Abbildung 15).

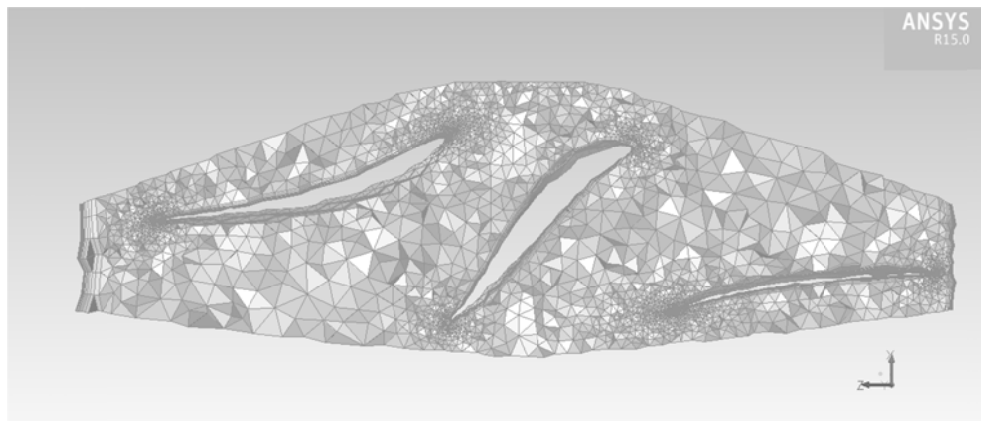


Abbildung 15: Schnitt durch Propellergitter

Diese Art der Gittergenerierung ermöglicht eine schnelle halbautomatische Erzeugung des Berechnungsgitters für den Propeller unter der Voraussetzung, dass eine exakte Geometrie des Propellers vorliegt.

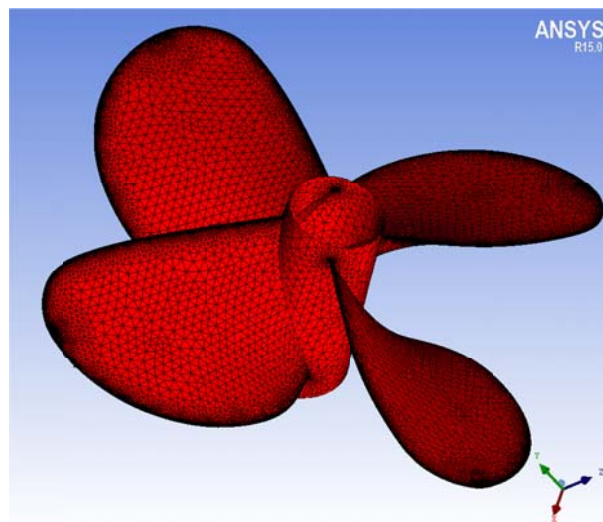


Abbildung 16: Oberflächengitter Propeller P259

Beide Propellergitter wurden an den Eintritts- und Austrittskanten verfeinert, um die Kantenumströmung und die dort auftretenden Gradienten hinreichend für diese Untersuchungen aufzulösen (Abbildung 16). Für eine Optimierung des Propellers sind weitere lokale Verfeinerungen notwendig, um alle Effekte der speziellen Propellerumströmung zu erfassen.

Die Schiffsgitter für beide Projekte (FGS, Tanker) bestanden aus ca. 8,0 Millionen Elementen. Die Anzahl der Volumenelemente bei beiden Propellern lag bei ca. 4,0 Millionen.

4.3. Berechnungsfälle

Definition der Modelle und Hauptparameter der Berechnungen

Die numerischen Untersuchungen wurden an Schiffen durchgeführt, mit denen im Rahmen dieses Projektes auch Großausführungsmessungen realisiert wurden. Dabei handelt es sich um typische Binnenschiffe mit unterschiedlichen Transportaufgaben. Die ausführliche geometrische Beschreibung der untersuchten Modelle des Fahrgastschiffes und des Binnentankers erfolgte im Abschnitt 3.2.

Schiff	Tiefgang	Wassertiefe	Geschwindigkeit
FGS	1,5 m	5,0 m	24,0 km/h
Binnentanker	2,1 m	(10,0 m) ²	14,0 bis 21,0 km/h

Tabelle 3: Daten der Berechnungen für die Großausführung

Die Berechnungen wurden für beide Modelle im Modellmaßstab und in der Großausführung durchgeführt.

$$\lambda_{\text{Fahrgastschiff}} = 10,00$$

$$\lambda_{\text{Binnentanker}} = 16,36$$

Die für die numerischen Untersuchungen ausgewählten Propeller entsprechen denen, die an den Schiffsmodellen installiert wurden. Beide Modelle wurden für die Berechnungen voll ausgerüstet. Das heißt, dass alle Anhänge geometrisch und numerisch modelliert wurden.

Bei allen Berechnungen wurden die Modelle fest eingespannt und erfahren keine dynamische Schwimmlagenveränderung in Folge der Fahrt des Schiffes durch das Wasser. Die Verformung der Wasseroberfläche wird für die hier durchgeführten numerischen Propulsionsversuche vernachlässigt, um den Berechnungsaufwand für die durchgeführten Untersuchungen zu minimieren.

Propulsionsversuche mit Kraft-Scheiben-Modell in Ansys CFX

Bei den numerischen Untersuchungen mit dem Kraft-Scheiben-Modell (KSM) wird davon ausgegangen, dass durch die Implementation der Wirkung des Propellers, sich die Geschwindigkeits- und Druckverhältnisse im Bereich der Antriebsmaschine ähnlich wie bei einem realen Propeller einstellen. Bei diesem Verfahren sind die Ergebnisse eines Freifahrtversuches des Propellers die Basis für die im KSM vorzugebenen Kraftgrößen. Die radiale Verteilung der tangentialen und axialen Kräfte wird entsprechend dem am Schiff installierten Propeller gewählt und als Funktion im RANSE-Löser hinterlegt. Für jedes in der Propellerebene liegende Volumenelement werden die durch den Propeller induzierten Zusatzkräfte in alle 3 Richtungen (X-Y-Z) vorgegeben.

² Großausführungsversuche wurden zum späteren Zeitpunkt bei veränderter bzw. aktuell vorhandener Wassertiefe von 5,5 m durchgeführt

Mit dem ausgewählten Fahrgastschiff wurden bei gegebener Geschwindigkeit des Schiffes und einer Wassertiefe, entsprechend den Bedingungen auf dem Rhein, numerische Untersuchungen mit dem Kraft-Scheiben-Propellermodell durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Drehzahl zu ermitteln, die notwendig ist, um das Schiff mit dem gelieferten Propeller bei der gewählten Geschwindigkeit zu bewegen.

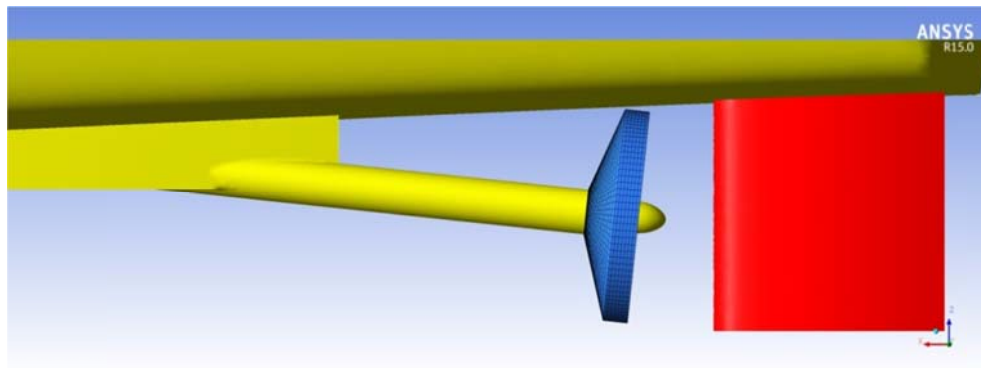


Abbildung 17: KSM am Fahrgastschiff

Die Kraftgrößen werden in Wirkrichtung des Propellers vorgegeben, da die Propellerwelle um ca. 6° geneigt ist. Alle vorhandenen Anhänge wurden ebenfalls bei den Berechnungen berücksichtigt (Abbildung 17).

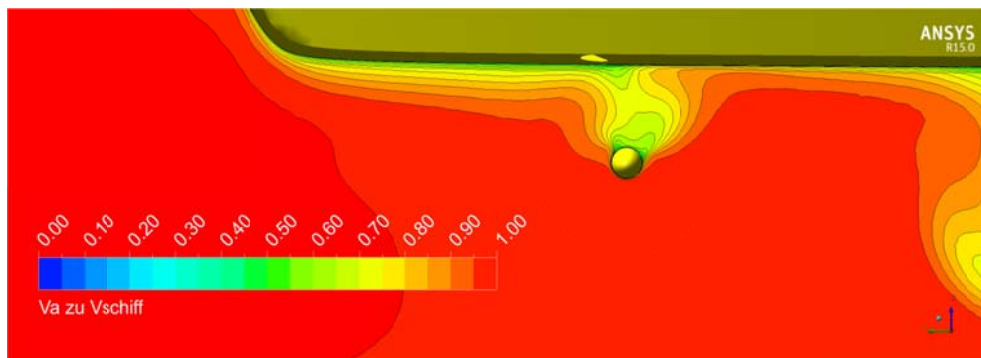


Abbildung 18: Nomineller Nachstrom in der Propellerebene

In Vorbereitung des numerischen Propulsionsversuches muss ein Widerstandsversuch durchgeführt werden, um den nominellen Nachstrom in der Propellerebene zu ermitteln. Die Ergebnisse des numerischen Widerstandsversuches sind in der Abbildung 18 und der Abbildung 19 dargestellt.

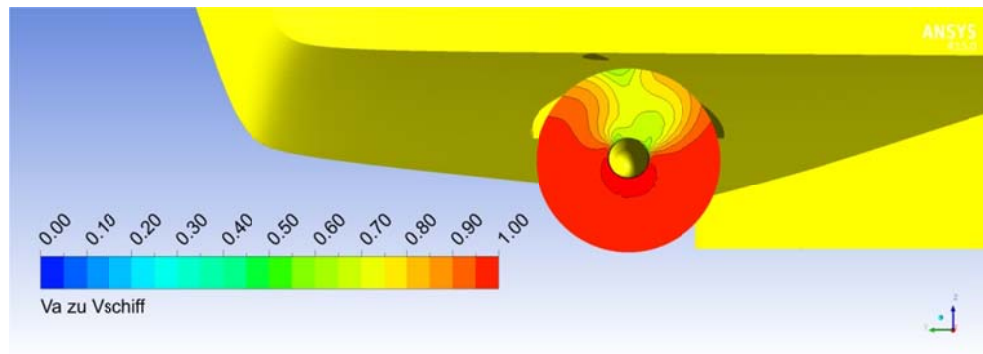


Abbildung 19: Nachstrom in Propellerkreisfläche

Aus der Integration des Druckes an der Schiffsaußenhaut ergaben sich der Widerstand und die gemittelte Anströmgeschwindigkeit zum Propeller (Tabelle 4). Der Wellenwiderstand wurde hier nicht berücksichtigt. Prinzipiell ist es möglich, diesen Anteil des Widerstandes in die Berechnungen einfließen zu lassen.

V_{Schiff}	6,662 m/s
V_A	6,094 m/s
Widerstand R_T	19300 N

Tabelle 4: Ergebnisse Numerischer Widerstandsversuch FGS

Vorabschätzung der Drehzahl

Aus den Ergebnissen des numerischen Widerstandsversuches und dem Freifahrt diagramm des Propellers kann der Drehzahlbereich für den Betriebspunkt abgeschätzt werden. Häufig wird das Freifahrt diagramm des Propellers, wie auch in diesem Projekt, vom Hersteller bzw. dem Entwurfsbüro direkt geliefert. Die Beiwerte für Propellerschub und Drehmoment können aber auch numerisch oder bei Vorhandensein eines Modellpropellers experimentell ermittelt werden.

Aus einem Freifahrt diagramm des Propellers kann der Schubbeiwert in Näherung durch die folgende Funktion linear approximiert werden, wenn für C_1 und C_2 passende, iterativ ermittelte Zahlenwerte eingesetzt werden:

$$K_T = C_1 + C_2 * \frac{V_A}{n * D}$$

Da der Propeller ohne Beachtung des Soges einen Schub erzeugen muss, der dem Widerstand bei einer gegebenen Geschwindigkeit entspricht, ersetzt man in der allgemeinen Definition des Schubbeiwertes K_T den Propellerschub T durch den Widerstand des Schiffes R_T . Es ergibt sich folgende Funktion für den Schubbeiwert:

$$K_T \sim \frac{R_T}{\rho * n^2 * D^4}$$

Durch Gleichsetzen der beiden Definitionen für K_T kann die Gleichung in eine quadratische Gleichung für die Drehzahl überführt werden.

$$\frac{R_T}{\rho * n^2 * D^4} = C_1 + C_2 * \frac{V_A}{n * D}$$

$$n^2 + n * \left(\frac{C_2}{C_1} * \frac{V_A}{D} \right) + \frac{-R_T}{C_1 * \rho * D^4} = 0$$

Für die grob abgeschätzte Drehzahl ergeben sich dann folgende Lösungen:

$$n_{1/2} = -\frac{1}{2} * \frac{C_2}{C_1} * \frac{V_A}{D} \mp \sqrt{\left(\frac{1}{2} * \frac{C_2}{C_1} * \frac{V_A}{D} \right)^2 - \left(\frac{-R_T}{C_1 * \rho * D^4} \right)}$$

Für den in der Tabelle 4 beschriebenen Fahrtzustand des Fahrgastschiffes und unter Einbeziehung der Approximation des Schubbeiwertes aus dem Freifahrt diagramm des Propellers PM080210 (Abbildung 20) ergibt sich mit den Werten für Widerstand, Anströmgeschwindigkeit, Propellerdurchmesser und den Konstanten C_1 und C_2 die abgeschätzte Drehzahl von $7,511 \text{ s}^{-1}$, mit der der Propeller rotieren muss, um das Schiff mit der gewählten Geschwindigkeit zu bewegen (Tabelle 5).

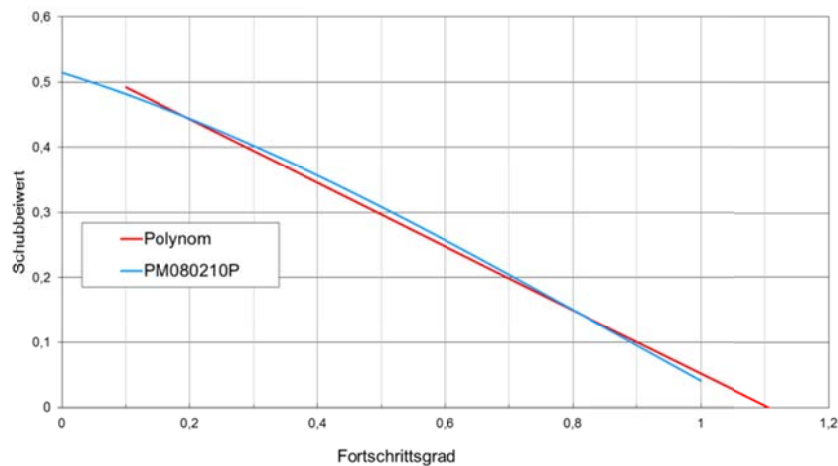


Abbildung 20: Approximation des Schubbeiwertes für Propeller PM080210P

Diese nominelle Drehzahl berücksichtigt nicht die Wechselwirkungen zwischen Propeller und Schiff und ist aus diesem Grund nur als grobe Abschätzung geeignet um die Berechnung der Drehzahl unter Propulsionsbedingungen für alle folgenden Berechnungen zu verkürzen.

Numerischer Widerstandsversuch	Approximation Schubbeiwert aus Freifahrt diagramm	Propellergeometrie
R _T =19300 N	C ₁ = 0,54106	D = 1,15 m
V _A = 6,094 m/s	C ₂ = -0,4891	
n _{nominell} = 7,511 s ⁻¹		

Tabelle 5: Drehzahlabschätzung für Fahrgastschiff

Iterative Ermittlung der Drehzahl im CFD-Propulsionsversuch

Für das Kraft-Scheiben-Modell (KSM) wurde die bisher im DST angewandte Methode zur Realisierung der Wirkung des Propellers angepasst. Die Kräfte am Propeller werden entsprechend dem Widerstand aus der CFD-Rechnung direkt dem Propellerscheibenmodell unter Berücksichtigung der Wirkrichtung der Schiffsschraube zugeordnet und entsprechend der durch die Propellergeometrie vorgegebenen Belastungsverteilung auf die Volumenelemente verteilt. Diese Zuordnung erfolgt intern durch den Solver mit sogenannten User-Routinen.

Iteration		Beschreibung		Ausgabe
0		Numerischer Widerstandsversuch		R_{T0} V_{A0} J_0
a.0	Äußere Iteration	Einschalten der Propulsionswirkung $T_{P1,X} = R_{T1,X}$ (gilt für alle Iterationen, wenn sich R_T ändert, ändert sich auch T_P) R_T ändert sich gegenüber Iteration 0 Drehzahl $n_{a,0}$ auswählen und mit V_{A0} aus Iteration 0 den Fortschrittsgrad J_0 bestimmen Mit Schubidentität $K_{Qb,0}$ ermitteln		$R_{Ta,0}$ $K_{Ta,0}$ $K_{Qb,0}$
b.0		Tangentiale Kräfte mit $K_{Qb,0}$ einschalten R_T ändert sich gegenüber Iteration a.0 durch tangentielle Zusatzkräfte Mit Schubidentität $K_{Qb,1}$ ermitteln		$R_{Tb,0}$ $K_{Tb,0}$ $K_{Qb,1}$
b.1		Axiale Kräfte entsprechend $K_{Qb,1}$ setzen R_T ändert sich auf Grund der radialen Wirkung des Propellers $K_{Qb,2}$ ermitteln aus Schubidentität		$R_{Tb,1}$ $K_{Tb,1}$ $K_{Qb,2}$
b.2		Axiale Kräfte entsprechend $K_{Qb,2}$ setzen Überprüfen der Abweichung der Schubbeiwerte aus b.1 und b.2		$R_{Tb,2}$ $K_{Tb,2}$ $K_{Qb,1}$ $J_{b,2}$
	$K_{Tb,1} \cong K_{Tb,2}$		$K_{Tb,1} \neq K_{Tb,2}$	
	$J_{b,1}$ aus Schubidentität ermitteln und mit J_0 vergleichen		$K_{Qb,1}$ aus Schubidentität ermitteln	
	$J_{b,1} \cong J_0$	$J_{b,1} \neq J_0$	weiter in b.1 mit $K_{Qb,1}$	
	$n = n_{a,0}$	$n_{a,0}$ neu setzen		
	Fertig	a.0		

Tabelle 6: Iterative Ermittlung der Drehzahl n

Die Zuordnung der aus dem Drehmoment resultierenden tangentialen Kraftgrößen erfolgt über die Methode der Schubidentität über das hinterlegte Freifahrtdiagramm des Propellers. In der folgenden Tabelle 6 ist der Iterationszyklus zur Ermittlung der Drehzahl

schematisch dargestellt. Die Anzahl der inneren (rot - iterative Ermittlung von K_Q entsprechend dem K_T aus Widerstandsberechnung) und äußeren Iterationen (blau – Drehzahlbestimmung) ist im Vorfeld nicht bekannt und kann stark schwanken. Dadurch ist die Rechenzeit für den gesamten Propulsionsversuch nicht klar abschätzbar.

Die Wirkung des Propellers beeinflusst die Werte für Druck und Geschwindigkeit im gesamten Lösungsgebiet kaum. Durch die Beschleunigung des Wassers im Umfeld des Propellers werden lokale Druckveränderungen im Hinterschiff induziert, die zu einer geringen Erhöhung des Widerstandes führen.

Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse des numerischen Widerstandsversuches als Anfangsinitialisierung für die Iterationen genutzt. Ein auskonvergierter Widerstandsversuch führte dazu, dass die folgenden Iterationsschritte mit verändertem Drehmoment und veränderter Drehzahl sehr schnell konvergierten. Dadurch konnte die Rechenzeit erheblich reduziert werden. Die Abbildung 21 zeigt die Änderung der Beiwerte bis zum Erreichen des Iterationszieles (innere Iteration).

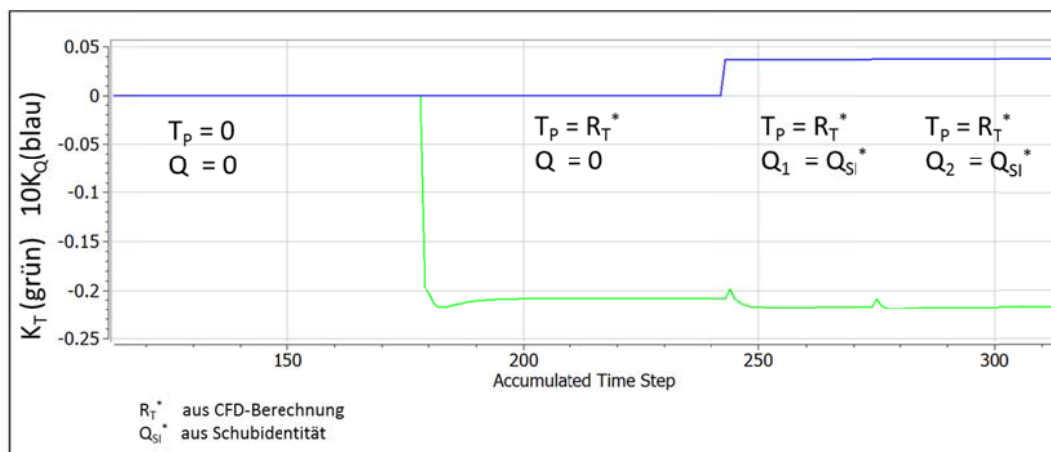


Abbildung 21: Änderung der Propellerbeiwerte im Iterationsprozess

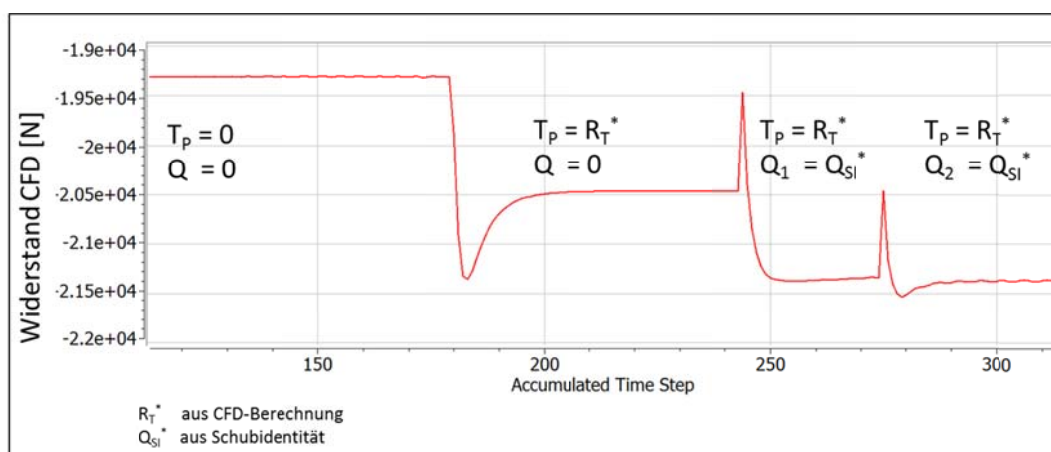


Abbildung 22: Änderung des Widerstandes im Iterationsprozess

Die Änderungen des Widerstandes für das Fahrgastschiff in Abhängigkeit von der Intensität der Propellerwirkung zeigt die Abbildung 22 für die Drehzahl $n = 8 \text{ s}^{-1}$. Es ist dabei zu beachten, dass die Abbildung 21 und die Abbildung 22 nur die Ergebnisse der inneren

Iteration darstellen. Weitere Iterationen mit anderen Drehzahlen sind notwendig, bis die korrekten Werte für Schub, Drehmoment und Drehzahl ermittelt werden können, mit denen das Schiff mit der gewählten Geschwindigkeit bewegt werden kann.

Die Implementierung von Schub und Drehmoment in der Propellerebene mit dem KSM hat, wie erwartet, eine Veränderung der Strömungsverhältnisse vor und hinter der Propellerscheibe zur Folge (Abbildung 23).

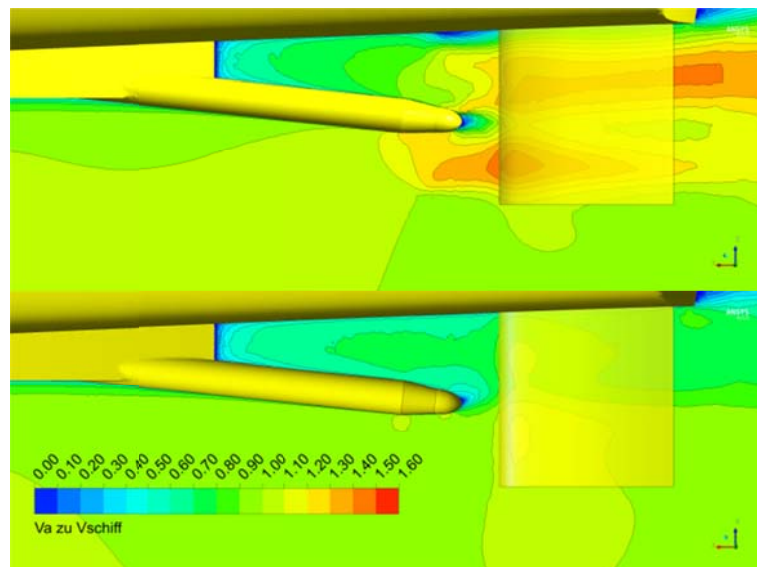


Abbildung 23: V_A / V_{Schiff} in Y-Ebene (Propellerwelle) mit KSM oben und ohne KSM unten

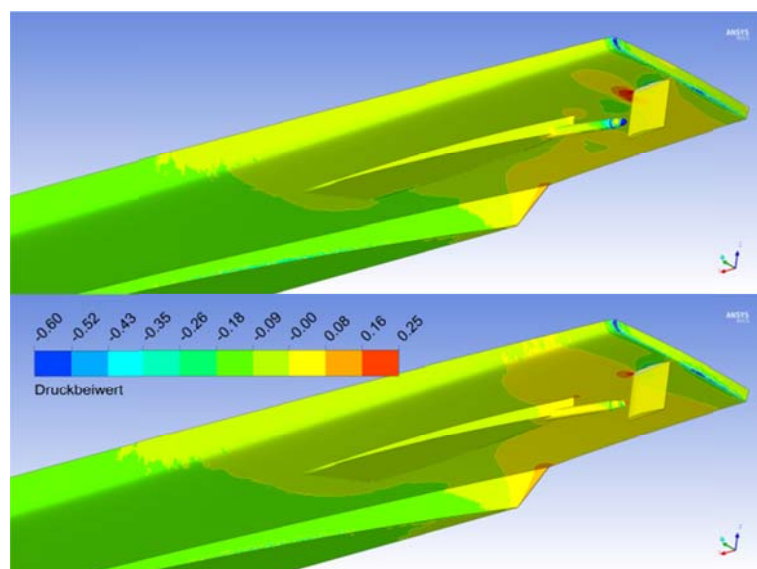


Abbildung 24: Druckbeiwert mit KSM oben und ohne KSM unten

Die Abbildung 24 zeigt die lokalen Veränderungen des Druckes im Nahbereich der wirkenden Propellerscheibe. Der Druck am Rumpf wird reduziert, ausgenommen der Bereich des Staupunktes am Ruder, bei dem die Beschleunigung des Wassers zu einem erhöhten Staudruck führt.

In der folgenden Tabelle 7 sind die Berechnungsergebnisse für das Fahrgastschiff (Zweischrauber) dargestellt.

Iteration a.1 Drehzahl $n = 7,5 \text{ s}^{-1}$						
Iteration	R_T	K_T	K_Q	V_A	J_0 bzw. J_i^3	Q
0	38600 N	0	0	$6,94 \text{ ms}^{-1}$	0,706	0
i.1	40920 N	0,183	0		0,740	0
i.2	42714 N	0,191	0,0325		0,725	4175 Nm
i.3	42826 N	0,1915	0,0340		0,724	4368 Nm
Iteration a.2 Drehzahl $n = 8,0 \text{ s}^{-1}$						
Iteration	R_T	K_T	K_Q	V_A	J_0 bzw. J_i	Q
0	38600 N	0	0	$6,94 \text{ ms}^{-1}$	0,662	0
i.1	40920 N	0,1841	0		0,735	0
i.2	42740 N	0,192	0,0330		0,722	4239 Nm
i.3	42880 N	0,193	0,0345		0,720	4432 Nm
Iteration a.3 Drehzahl $n = 7,75 \text{ s}^{-1}$						
Iteration	R_T	K_T	K_Q	V_A	J_0 bzw. J_i	Q
0	38600 N	0	0	$6,94 \text{ ms}^{-1}$	0,683	0
i.1	40936 N	0,196	0		0,735	0
i.2	42728 N	0,206	0,0350		0,696	4219 Nm
Iteration a.4 Drehzahl $n = 7,70 \text{ s}^{-1}$						
Iteration	R_T	K_T	K_Q	V_A	J_0 bzw. J_i	Q
0	38600 N	0	0	$6,94 \text{ ms}^{-1}$	0,688	0
i.1	40930 N	0,199	0		0,71	0
i.2	42718 N	0,207	0,035		0,695	4165 Nm
i.3	42748 N	0,208	0,0355		0,693	4225 Nm

Tabelle 7: Berechnungsergebnisse mit KSM für das Fahrgastschiff (iterativ)

Der in der obigen Tabelle dokumentierte Widerstand gilt für das gesamte Schiff, die Beiwerte und die nominelle Geschwindigkeit sind bezogen auf den Einzelpropeller. Als Ergebnis dieses Iterationsprozesses ergibt sich näherungsweise eine Drehzahl von $n = 7,7 \text{ s}^{-1}$ für jeden Propeller. Das Abbruchkriterium „ J_0 (aus V_A ; D und n) ist annähernd J_i (aus

³ J_0 ist berechnet aus V_A , D , n und $J_{i,n}$ ergibt sich aus Schubidentität

Schubidentität“ wurde erreicht (grün markiert). Eine exaktere Bestimmung der Drehzahl ist durch weitere Iterationsschritte möglich.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass durch die Vielzahl notwendiger Iterationen die Effizienz des numerischen Propulsionsversuches mit dieser Methode stark eingeschränkt ist. Aus diesem Grund wurde nach effektiveren Methoden gesucht.

Ermittlung der Drehzahl im CFD-Propulsionsversuch durch Interpolation

Basierend auf dem gleichen Modell zur Realisierung der Propellerwirkung (KSM) wurde eine 2. Methode zur Ermittlung der Drehzahl und der notwendigen Belastung des Propellers zum Antrieb des Schiffes bei einer definierten Geschwindigkeit untersucht. Bei diesem Verfahren müssen für jeden Propulsionspunkt 5 Arbeitsschritte durchgeführt werden (Tabelle 8). Die Vorgehensweise ist stark an den Modellversuch zur Ermittlung der Propulsionspunkte angelehnt.

Arbeits-schritt	Beschreibung	Input	Output
1	Numerischer Widerstandsversuch	V_{schiff}	$V_A; R_T$
2	Abschätzung der Drehzahl n_{nominell} ohne Sog (siehe Seite 21)	$V_A; R_T; D$ FFD	n_{nominell}
3	Numerischer Propulsionsversuch mit Schub und Drehmoment des Propellers aus FFD bei einer gewählten Drehzahl $n_1 = n_{\text{nominell}} - \Delta n^4$	V_{schiff} $T_{P1}; Q_1$ n_1	R_{T1} Restkraft $F_1 = R_{T1} - T_{P1}$
4	Numerischer Propulsionsversuch mit Schub und Drehmoment des Propellers aus FFD bei einer gewählten Drehzahl $n_2 = n_{\text{nominell}} + \Delta n$	V_{schiff} $T_{P2}; Q_2$ n_2	R_{T2} Restkraft $F_2 = R_{T2} - T_{P2}$
5	Interpolation der Drehzahl aus den Restkräften F_1 und F_2 für eine Drehzahl bei der die Restkraft = 0 wird	$n_1; n_2$ $F_1; F_2$	n

Tabelle 8: Ermittlung der Drehzahl n durch Interpolation

Diese Methode führt sehr schnell zu einem Ergebnis für jede zu fahrende Geschwindigkeit des Schiffes. Im Vergleich zur iterativen Methode (Tabelle 7) liegen die Vorteile deutlich auf Seiten der hier beschriebenen Methode.

Für die Fahrt des Schiffes mit einer Geschwindigkeit von ($V_{\text{Schiff}} = 6,662 \text{ ms}^{-1}$) unter den ab Seite 19 beschriebenen Bedingungen ergibt sich eine Drehzahl für diesen Pro-

⁴ Δn kann frei gewählt werden entsprechend der gewünschten Genauigkeit

pulsionspunkt von $n = 7,72 \text{ s}^{-1}$. Die Teilergebnisse aus den einzelnen Arbeitsschritten sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

AS	V_A [ms ⁻¹]	n [s ⁻¹]	K_T	K_Q	R_T [kN]	Restkraft [kN]
1	6,094				38,6	
2		7,51				
3		7,50	0,1955	0,0347	42,3	-1,97
4		8,00	0,2170	0,0381	43,5	2,48
5		7,72	0,2118	0,0363	44,0	0

Tabelle 9: Ermittlung der Drehzahl für den Propulsionspunkt

Erkenntnisse aus den Propulsionsversuchen mit dem Kraftscheibenmodell

Eine Ermittlung von Propulsionspunkten unter Anwendung des Kraftscheibenmodells ist prinzipiell möglich. Die Einsatzmöglichkeit dieses Verfahren für numerische Propulsionsversuche ist abhängig von der Genauigkeit und dem Einfluss der fehlenden direkten Wechselwirkung.

Beide untersuchte Methoden kamen zu den gleichen Resultaten. Die effizientere KSM-Methode ist die Methode der Interpolation zur Restkraft NULL zwischen zwei Berechnungsergebnissen.

Nachteilig bei beiden Methoden ist, dass die in der Propellerscheibe implementierten Kraftgrößen aus einem Freifahrt diagramm (FFD) des Propellers bereitgestellt werden müssen. Die aufgetragenen Beiwerte für den Schub und das Drehmoment des Propellers werden in der Regel aus Modellversuchen mit einem freifahrenden Modellpropeller gewonnen.

Durch die direkte Ermittlung von Schub und Drehmoment, gekoppelt mit der Berechnung der Schiffsumströmung, werden die Verhältnisse des am Schiff arbeitenden Propellers besser wiedergeben. Aus diesem Grund und insbesondere da sich die Leistungsfähigkeit der für die CFD-Berechnungen eingesetzten Technik deutlich verbessert hat, soll überprüft werden, ob eine Installation eines geometrisch aufgelösten Propellers am Hinterschiff für numerische Propulsionsversuche praxisrelevant eingesetzt werden kann.

Um den zeitlichen Aufwand für eine Berechnung für die praktische Anwendung gering zu halten, beschränken sich diese Untersuchungen auf den quasistationären Zustand. Eine transiente (zeitliche Auflösung) Herangehensweise ist immer noch mit hohen Rechenzeiten verbunden und für den praxisrelevanten Einsatz mit bezahlbarer Rechentechnik aktuell nicht realisierbar.

Freifahrtversuche mit einem Propeller

Für eine erfolgreiche Anwendung des geometrisch aufgelösten Propellers am Hinterschiff für den Propulsionsversuch muss überprüft werden, ob die Kräfte und Momente am Propeller hinreichend genau berechnet werden. Zur Validierung wurde ein Freifahrtversuch mit einem Propeller modelliert. Die Berechnungen wurden mit unterschiedlichen Gitterauflösungen durchgeführt und mit den experimentellen Werten aus dem Freifahrtprogramm verglichen.

Die Bedingungen des numerischen Freifahrtversuches wurden entsprechend dem experimentellen Versuchsaufbau definiert (Abbildung 25).

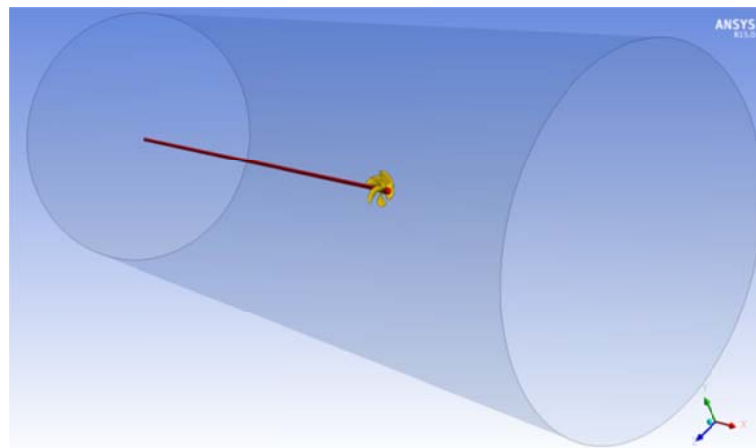


Abbildung 25: Numerischer Versuchsaufbau Propellerfreifahrt

Im Unterschied zum Experiment wurden außer dem Propeller kein Dynamometer, sondern nur Propellerwelle und Nabenkappe modelliert.

Beispielhaft sind in Abbildung 26 die durch den Propeller induzierten Geschwindigkeiten in einer Ebene dargestellt für eine Drehzahl von $n = 10 \text{ s}^{-1}$ und einer Anströmgeschwindigkeit von $V_A = 3,45 \text{ ms}^{-1}$ ($J = 0,3$).

Im Vergleich dazu sind in der Abbildung 27 die mit v_A normierten Geschwindigkeiten für einen Fortschrittsgrad von $J = 1,0$ dargestellt. Bei diesem Fortschrittsgrad werden fast keine Zusatzgeschwindigkeiten erzeugt.

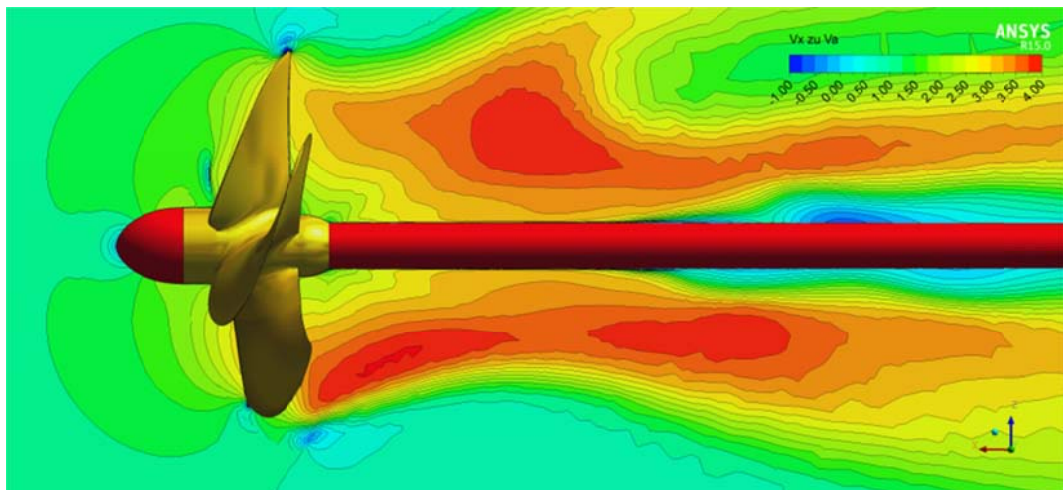


Abbildung 26: V_x/V_A in Y-Ebene bei Propellerfreifahrt ($J=0,3$)

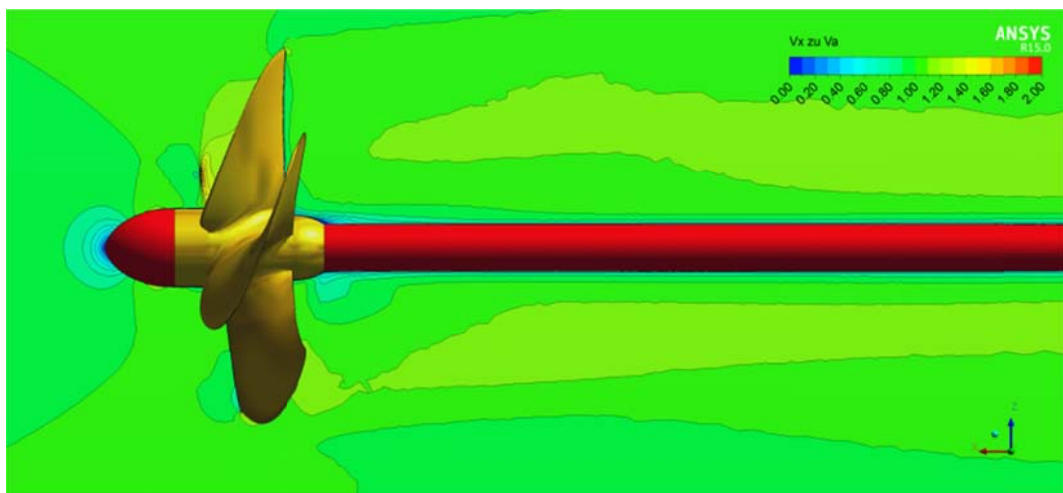


Abbildung 27: V_x/V_A in Y-Ebene bei Propellerfreifahrt ($J=1,0$)

Die Darstellung der Relativgeschwindigkeiten in Abbildung 26 ist abhängig von der Flügelstellung und zeigt keine gemittelten Werte. Im Diagramm in Abbildung 28 sind die berechneten Propellerfreifahrtwerte den Werten aus dem Experiment gegenübergestellt.

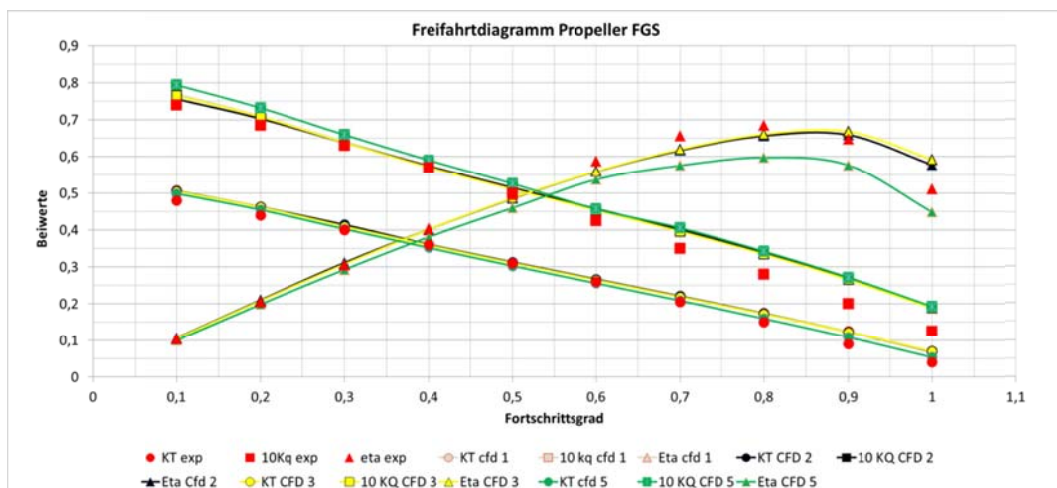


Abbildung 28: Freifahrt diagramm Propeller FGS

Die Schubbeiwerte werden bei allen Gittervarianten mit ausreichender Genauigkeit berechnet. Abweichungen sind bei den Beiwerten für das Drehmoment insbesondere bei höherem Fortschrittsgrad zu erkennen.

Da die Schubbeiwerte eine gute Übereinstimmung zeigten und die Abweichungen für die Drehmomentbeiwerte durch verbesserte Propellergitter reduziert werden können, wie S. B. Müller in [7] zeigt, wurden die weiteren numerischen Untersuchungen zum Propulsionsversuch mit dem realen Propeller am Schiff durchgeführt.

4.4. Numerische Propulsionsversuche im Modellmaßstab

Untersuchungen mit dem Modell des Fahrgastschiffes

Mit den auf Seite 19 definierten Hauptparametern für das Fahrgastschiff wurden im Modellmaßstab numerische Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Drehzahl des am Schiff integrierten Propellers im vorher abgeschätzten Drehzahlbereich (Seite 21) verändert wurde. Die Werte für Propellerschub, Propellerdrehmoment und Widerstand wurden im Verlauf der Berechnung dokumentiert.

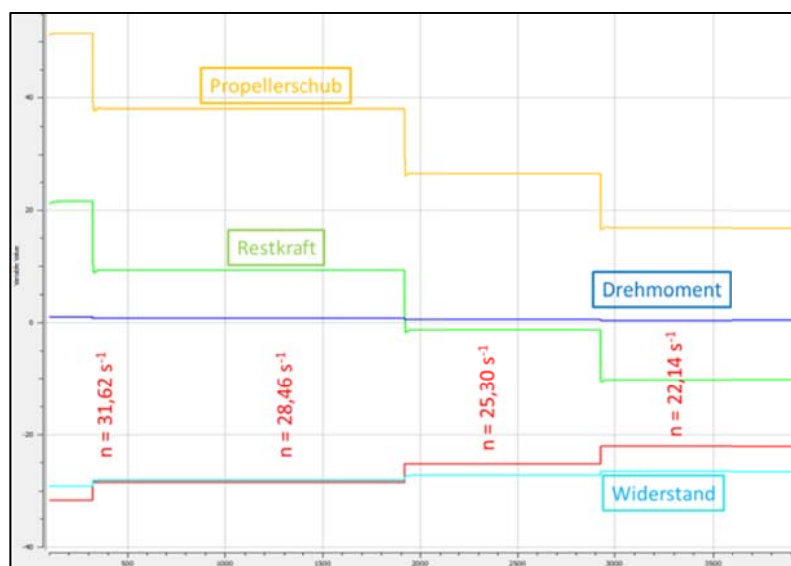


Abbildung 29: Propulsionsversuch Modell FGS

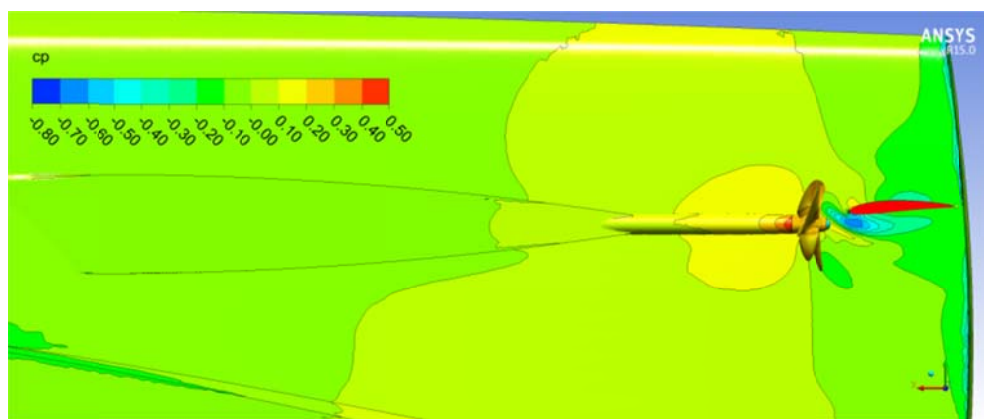
Jede Drehzahländerung wurde erst initiiert, wenn sich für den definierten Fahrtzustand stabile Werte für Schiffswiderstand und Schub und Moment am Propeller einstellten (Abbildung 29). Der hier dargestellte Widerstand gilt auf Grund der Ausnutzung der Symmetrie während der Berechnungen nur für ein halbes Schiff.

V_{Schiff} $2,107 \text{ ms}^{-1}$	Globales Koordinatensystem			Propellerkoordinatensystem	
Drehzahl $[\text{s}^{-1}]$	Widerstand [N]	Propellerschub [N]	Restkraft [N]	Propellerschub [N]	Drehmoment [Nm]
31,62	29,13	50,59	21,49	51,48	1,047
28,46	28,16	37,39	9,21	38,12	0,797
25,30	27,31	25,98	-1,33	26,58	0,58
22,14	26,64	16,35	-10,27	16,58	0,394

Tabelle 10: Berechnungsergebnisse Propulsionsversuch Modell FGS $\lambda=10$

In Tabelle 10 sind die aus den Berechnungen resultierenden Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst. Da die Propellerwelle geneigt ist, wurden die Ergebnisse für das Propellerkoordinatensystem (Wirkrichtung des Propellers) und für das globale Schiffskoordinatensystem (Fahrtrichtung Schiff) dargestellt.

Wie erwartet, führt die Erhöhung der Drehzahl nicht nur zu einem erhöhten Propellerschub sondern auch zu einer Erhöhung des Widerstandes am Schiff, bedingt durch die Sogwirkung des Propellers. Die folgenden Abbildungen zeigen, wie sich die Druckverhältnisse durch die Wirkung des Propellers am Hinterschiff verändern. In der Abbildung 30 rotiert der Propeller nicht und der Widerstand des Schiffes inklusive Ruder beträgt 23,9 N.

Abbildung 30: c_p am Hinterschiff Modell FGS $n = 0 \text{ s}^{-1}$

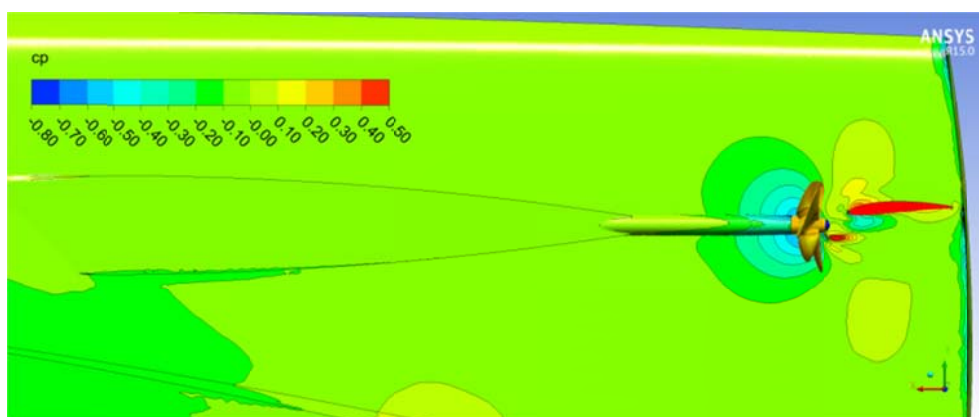


Abbildung 31: c_p am Hinterschiff Modell FGS $n = 31,62 \text{ s}^{-1}$

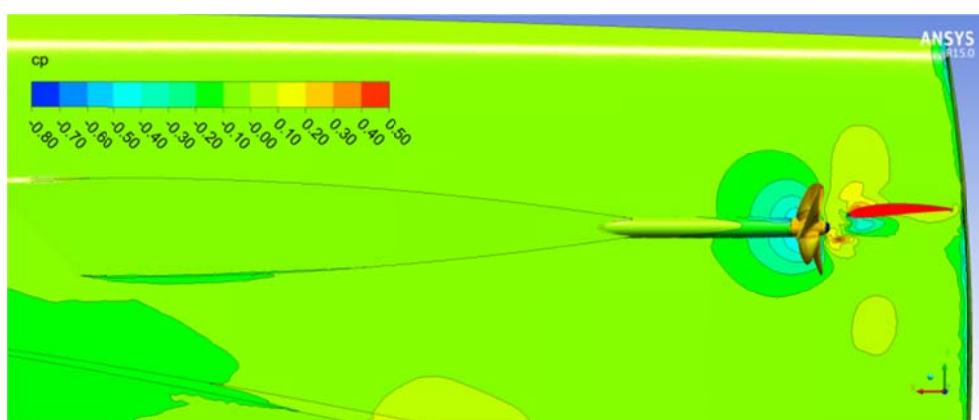


Abbildung 32: c_p am Hinterschiff Modell FGS $n = 28,46 \text{ s}^{-1}$

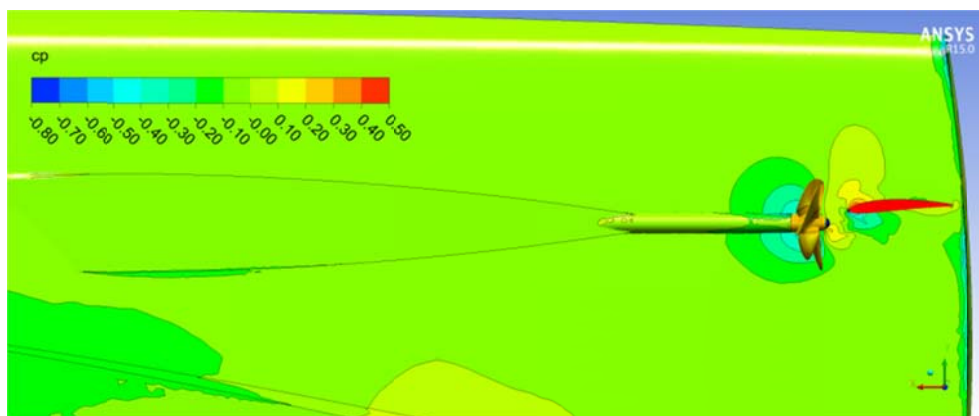


Abbildung 33: c_p am Hinterschiff Modell FGS $n = 25,30 \text{ s}^{-1}$

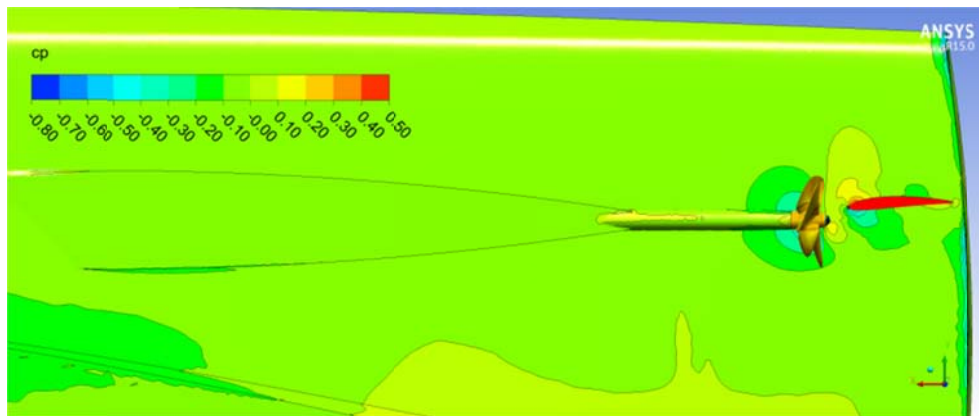
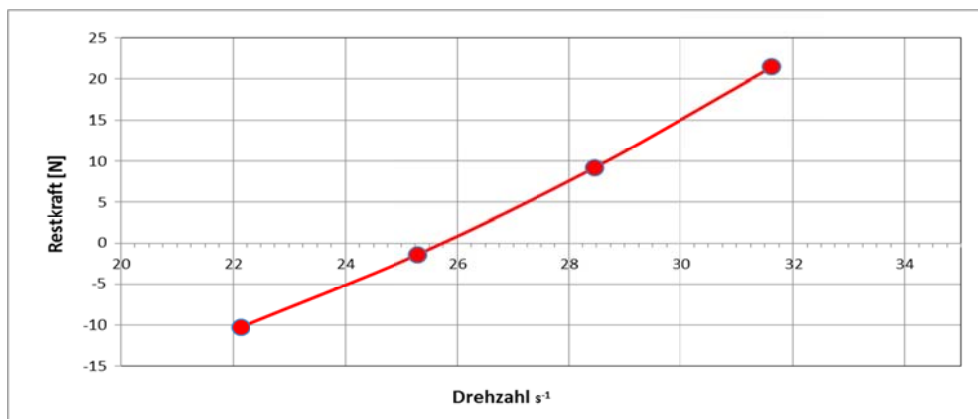
Abbildung 34: c_p am Hinterschiff Modell FGS $n = 22,14 \text{ s}^{-1}$ 

Abbildung 35: Drehzahlbestimmung Propulsionspunkt Modell FGS

Aus den integralen Größen (Tabelle 10) kann durch Interpolation für eine verschwindende Restkraft die Drehzahl für diesen Propulsionspunkt ermittelt werden. Es ergibt sich eine Drehzahl von $n = 25,7 \text{ s}^{-1}$.

Untersuchungen mit dem Modell des Binnentankschiffes

Die numerischen Untersuchungen mit dem Modell des Binnentankschiffes wurden im Modellmaßstab $\lambda = 16,36$ durchgeführt. Dargestellt werden zuerst die Ergebnisse einer Drehzahlvariation für eine gewählte Modellgeschwindigkeit, die mit den Versuchsbedingungen im Großversuch korreliert. Die Geschwindigkeit des Schiffsmodells durch das Wasser beträgt $v_{\text{Schiff}} = 1,237 \text{ ms}^{-1}$. Die Abbildung 36 bis Abbildung 38 zeigen schematisch die Veränderungen der Kräfte durch die Änderung der Drehzahl im Verlaufe der CFD-Berechnung.

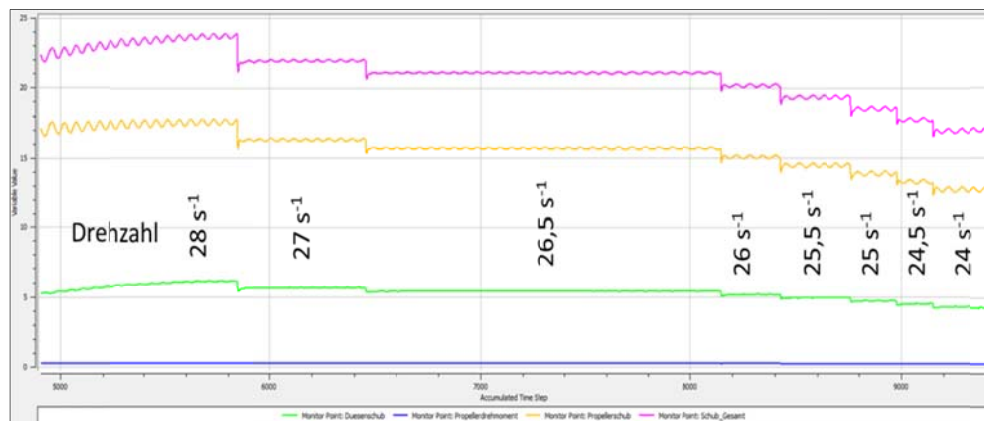


Abbildung 36: Zeitschrieb Drehzahlvariation Modell Tanker – Kräfte an Propeller und Düse

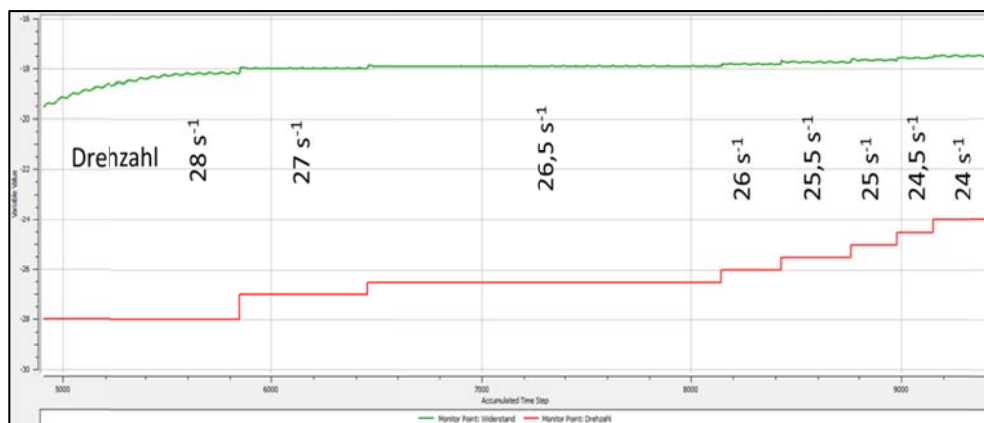


Abbildung 37: Zeitschrieb Drehzahlvariation Modell Tanker – Widerstand Schiff (negative Werte beachten)

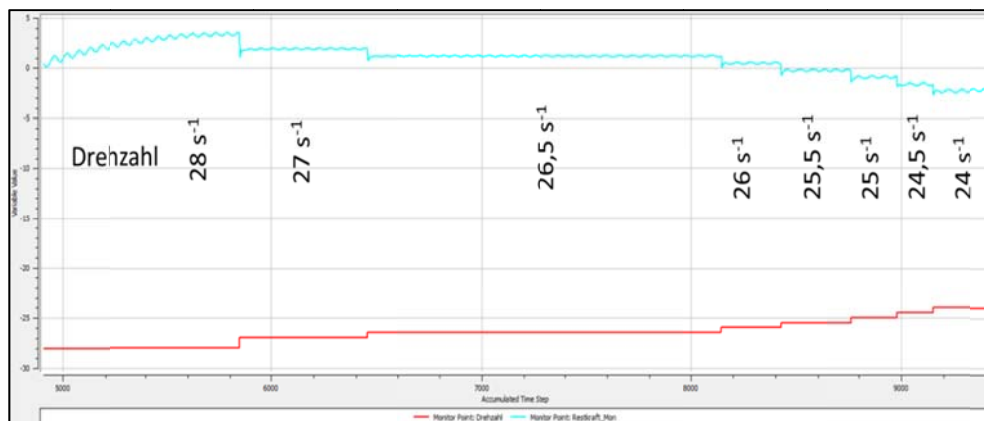


Abbildung 38: Zeitschrieb Drehzahlvariation Modell Tanker – Restkraft

Das Schiff wurde bei allen numerischen Modellversuchen mit den bekannten Anhängen (Ruder, Düse) ausgerüstet. Die Berechnungen zeigen, dass bei allen Drehzahlen kein konstanter Propellerschub erreicht werden kann. Die Ursache hierfür kann darin liegen, dass der Propeller in der Düse arbeitet. Auf Grund des geringen Spaltmaßes zwischen Düse und Propellerblattspitze kann es zu Unstetigkeiten kommen, die hydrodynamisch bedingt sein können (Ablösung). Eine numerische Instabilität ist jedoch nicht auszuschließen. Da die Schwankungen aber relativ gering sind (ca. 2 % im Maximum), wurde

die Auswertung mit den gemittelten Werten für den Propeller- und Düsen Schub mit den Werten aus Tabelle 11 vorgenommen.

$v_{\text{Schiff}} = 5,0 \text{ ms}^{-1}$					
Drehzahl [s ⁻¹]	Widerstand (Inkl. Ruder) [N]	Propellerschub [N]	Düsen Schub [N]	Restkraft [N]	Drehmoment [Nm]
28	20,20	17,5	6,10	3,40	0,277
27	19,99	16,3	5,60	1,91	0,257
26,5	19,79	15,6	5,38	1,19	0,247
26	19,69	15,0	5,15	0,46	0,238
25,5	19,52	14,4	4,92	-0,20	0,228
25	19,39	13,8	4,68	-0,91	0,219
24,5	19,25	13,2	4,46	-1,59	0,211
24	18,85	12,6	4,25	-2,00	0,202

Tabelle 11: Ergebnisse Drehzahlvariation Modell Tanker

Die Interpolation für die Restkraft gleich Null ergibt, dass der Propeller mit einer Drehzahl von $n = 25,65 \text{ s}^{-1}$ rotieren muss, um das Schiff mit der Geschwindigkeit von $1,237 \text{ ms}^{-1}$ zu bewegen. Die dazu benötigte Leistung kann mit dem dazu gehörenden Drehmoment bestimmt werden.

In weiteren Untersuchungen wurden für definierte Kombinationen aus Drehzahl des Propellers und Schiffsgeschwindigkeit die am Schiff und Propeller wirkenden Kräfte ermittelt. Diese Kombinationen wurden im Modellversuch experimentell untersucht und können mit den hier durchgeführten Untersuchungen verglichen werden.

Jede dieser Geschwindigkeit-Drehzahl-Kombinationen in der Tabelle 12 entspricht einem experimentell ermittelten Propulsionspunkt. Für die Geschwindigkeit $v_{\text{Schiff}} = 1,237 \text{ ms}^{-1}$ wurde eine Drehzahl von $21,7 \text{ s}^{-1}$ ermittelt. Im Vergleich dazu ist die numerisch berechnete Drehzahl deutlich höher ($25,65 \text{ s}^{-1}$).

Die Restkräfte in Tabelle 12 zeigen, dass zwischen experimentell und numerisch ermittelter Drehzahl eine Diskrepanz besteht. Möglicherweise könnte diese Abweichung reduziert werden, wenn in einem deutlich aufwendigeren Berechnungsmodell zusätzlich die Schwimmlagenänderung des Schiffes und die Wellenbildung am Schiff berücksichtigt werden.

v_{Schiff} [ms ⁻¹]	Schub			Widerstand (Inkl. Ruder) [N]	Restkraft [N]	Moment [Nm]	Drehzahl [s ⁻¹]
	Propeller [N]	Düse [N]	Gesamt [N]				
0,961	5,33	1,75	7,08	11,28	-4,2	0,087	15,8
1,099	7,28	2,37	9,65	14,55	-4,9	0,118	18,4
1,237	10,24	3,33	13,57	18,57	-5,0	0,164	21,7
1,304	11,72	3,91	15,63	20,73	-5,1	0,188	23,4
1,373	14,02	4,60	18,62	23,05	-4,43	0,222	25,3
1,442	16,80	5,48	22,28	25,92	-3,64	0,265	27,6

Tabelle 12: Ergebnisse CFD-Berechnung Propulsionsversuch Modell Tanker

Abgesehen von der bisher erreichten Genauigkeit ergeben sich Vorteile des numerischen Modellversuches darin, dass man intensive Einblicke in die Strömungsverhältnisse im Bereich der Antriebsanlage erhält, die experimentell nicht realisierbar sind (Abbildung 39).

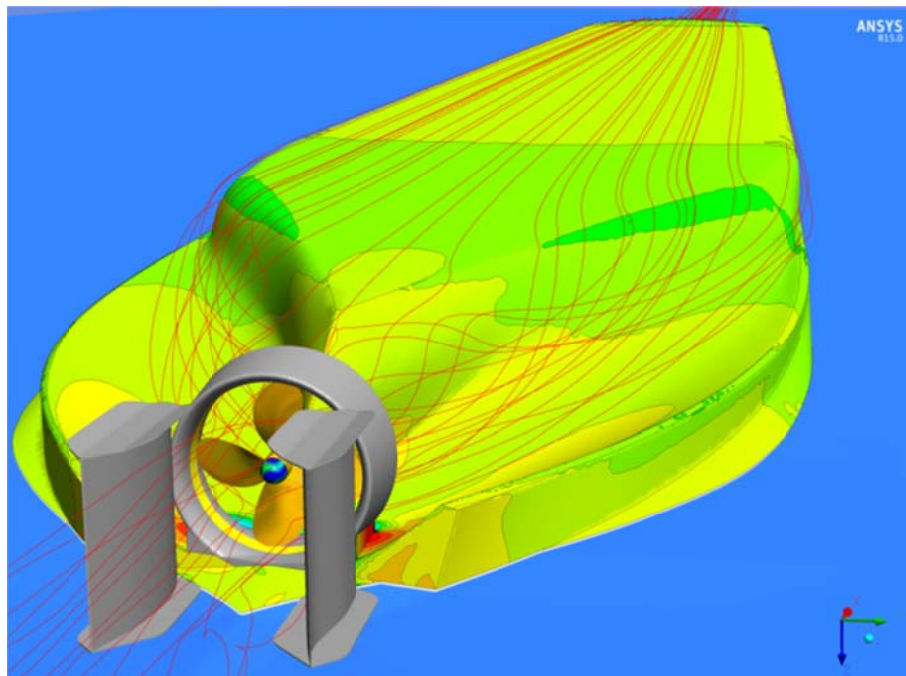


Abbildung 39: Stromlinien zur Antriebsanlage

4.5. Numerische Propulsionsversuche für die Großausführung der Schiffe

Untersuchungen mit der Großausführung des Fahrgastschiffes

Numerische Untersuchungen für die Großausführung sind deutlich einfacher zu realisieren als das Experiment mit dem fertig gebauten Schiff, da im Großversuch der Einfluss auf die äußeren Randbedingungen, wie zum Beispiel Witterungsbedingungen, Gewässerprofil und Strömungsgeschwindigkeit, stark eingeschränkt ist. Das macht aber auch den Vergleich der experimentellen und numerischen Methoden nicht einfach, da der Zeitpunkt des Großversuchs naturgemäß frühzeitig festgelegt werden muss, ohne dass die dann vorherrschenden Randbedingungen, wie zum Beispiel die Wassertiefe, bereits bekannt wären.

Die numerischen Versuche der Großausführung werden nach den gleichen Methoden wie für das Modell durchgeführt. Das Berechnungsgitter muss auf Grund der unterschiedlichen Grenzschichten im Wandbereich angepasst werden, so dass die vom Solver geforderte Anzahl der Volumenelemente normal zur Wand in der Grenzschicht liegt.

Da die Großausführungsversuche erst spät in der Projektphase realisierbar waren, mussten die numerischen Untersuchungen ohne die Kenntnis der realen Bedingungen des Großausführungsversuchs durchgeführt werden. Die Bedingungen wurden aber so gewählt, dass sie dem Fahrgebiet des FGS weitestgehend angelehnt sind. Die Abbildung 40 zeigt die Veränderung der Kraftgrößen am Schiff und Propeller im Verlauf der Berechnung infolge der Drehzahländerung.

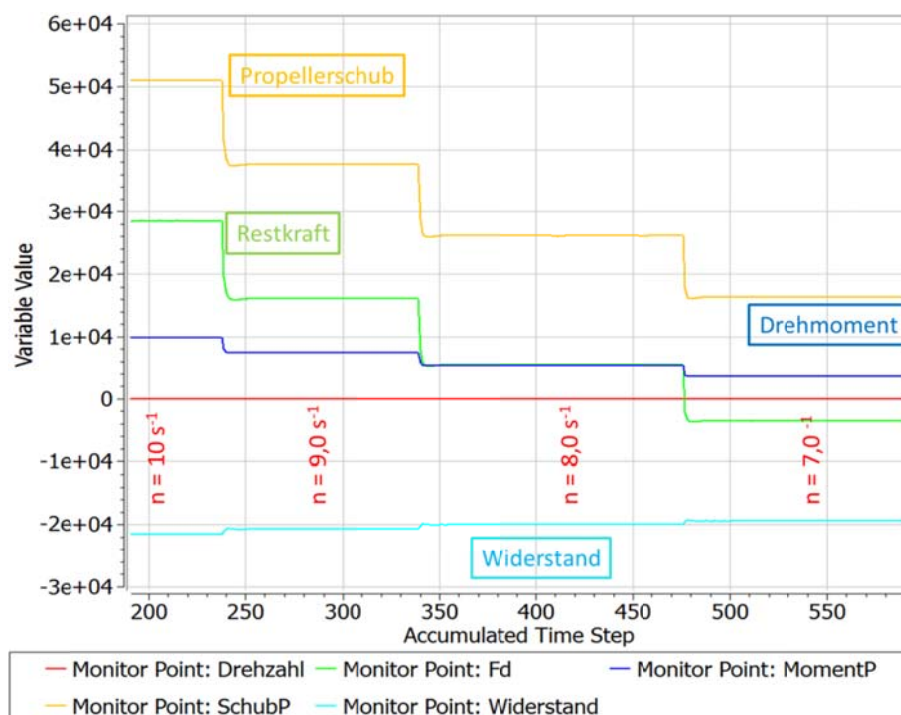


Abbildung 40: Propulsionsversuch Großausführung FGS

In der folgenden Tabelle 13 sind die auskonvergierten Ergebnisse der numerischen Berechnung für den Großausführungsversuch bei einer Wassertiefe von 5,0 m quantitativ zusammengefasst.

Aus den berechneten Ergebnissen ergibt sich für den Propulsionspunkt der Großausführung bei einer Geschwindigkeit von 24 km/h eine notwendige Drehzahl des installierten Propellers von $7,4 \text{ s}^{-1}$.

V_{Schiff} $6,662 \text{ ms}^{-1}$	Globales Koordinatensystem			Propellerkoordinatensystem	
Drehzahl $[\text{s}^{-1}]$	Widerstand [kN]	Propellerschub [kN]	Restkraft [kN]	Propellerschub [kN]	Drehmoment [kNm]
10	21,54	50,03	28,49	51,06	9,88
9	20,72	36,87	16,15	37,76	7,50
8	20,02	25,50	5,48	26,28	5,41
7	19,40	15,89	-3,51	16,48	3,61

Tabelle 13: Berechnungsergebnisse Propulsionsversuch Großausführung FGS

Die Druckverteilung am Schiffsrumpf oberhalb des Propellers ist abhängig von der Flügelstellung des Propellers. Die quasistationären Berechnungen mit dem Propeller wurden bei einer Flügelstellung des Propellers von 0° (siehe Abbildung 43 auf Seite 40) ausgeführt. Um den Einfluss der Lage der Propellerblätter auszuschließen, wurden bei anderen Positionen des Flügels Berechnungen realisiert (Abbildung 42).

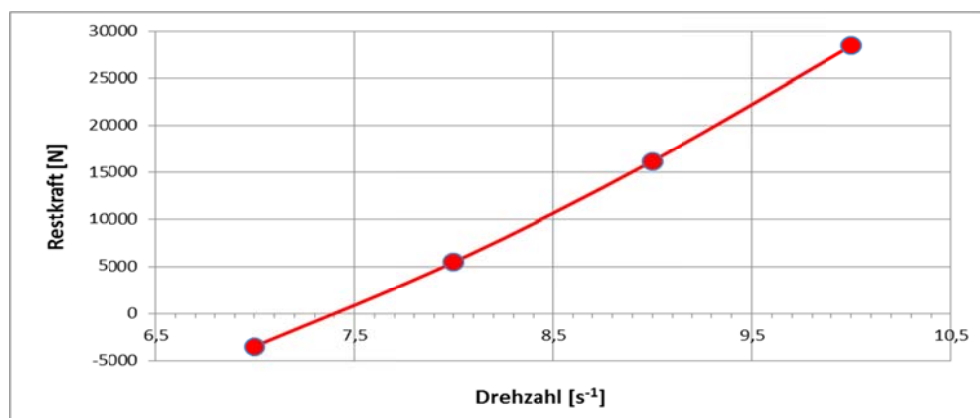


Abbildung 41: Drehzahlbestimmung Propulsionspunkt GA FGS

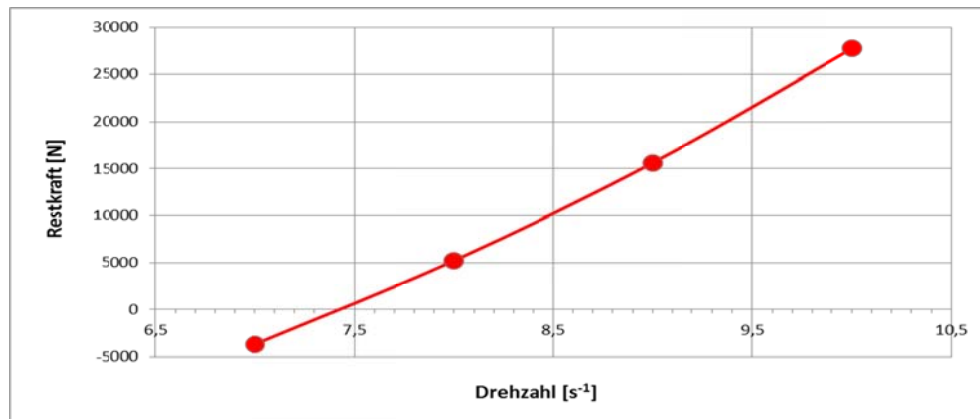


Abbildung 42: Drehzahlbestimmung Flügelstellung 36°

Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen, dass die Flügelstellung auf den Gesamtwiderstand und die Kräfte am Propeller keine großen Änderungen zur Folge hat. Für eine um 36° veränderte Flügelstellung ergab sich eine leicht erhöhte Drehzahl ($n = 7,42 s^{-1}$). Daraus schlussfolgernd wurden alle weiteren Berechnungen bei einer Flügelstellung von 0° durchgeführt.

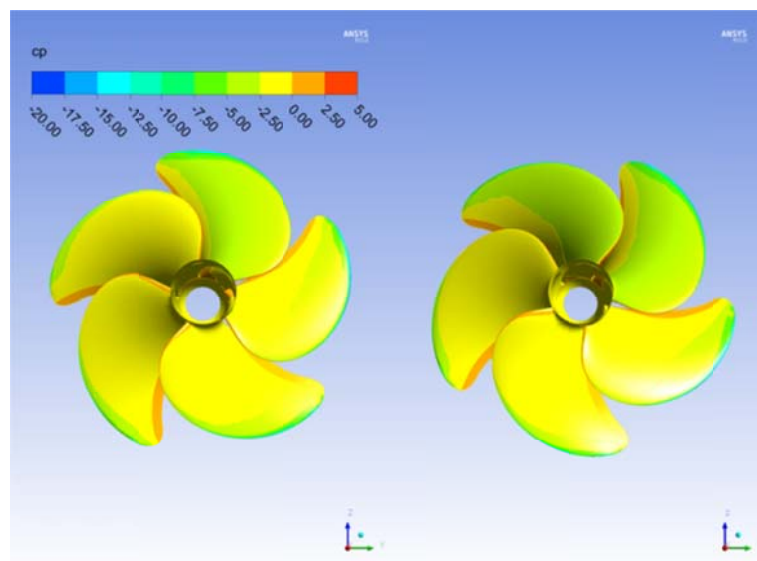


Abbildung 43: Druckbeiwert am Propeller bei Flügelstellung 0° (links) und 36° (rechts)

Untersuchungen mit der Großausführung des Binnentankschiffes

Für die Großausführung des Binnentankschiffes wurde wie bei den numerischen Untersuchungen im Modellmaßstab eine Variation der Drehzahl bei einer Schiffsgeschwindigkeit für die Großausführung von 18 km/h durchgeführt. Die Wassertiefe wurde entsprechend den Bedingungen auf dem Niederrhein gewählt und betrug 10 m.

Die Abbildung 44 zeigt den Verlauf der Berechnung und die Auswirkungen der Drehzahländerung auf Widerstand, Propellerschub und Drehmoment. Im Gegensatz zu den Untersuchungen im Modellmaßstab stellten sich konstante Werte für alle Kraftgrößen ein.

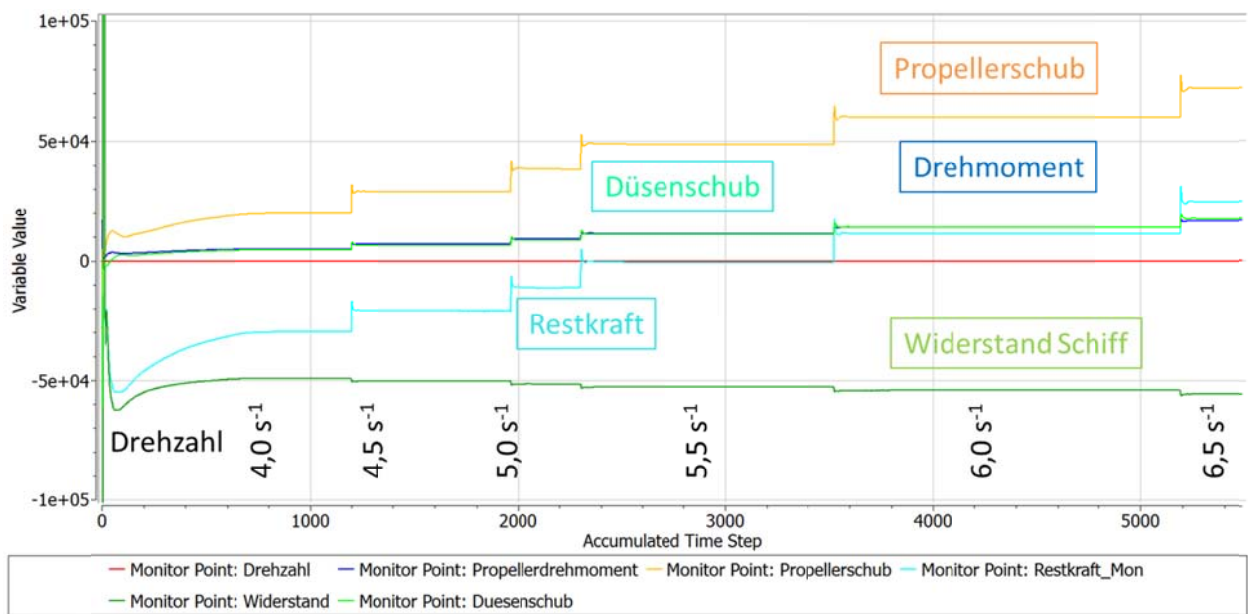


Abbildung 44: Drehzahlvariation Großausführung Tanker

Mit den auskonvergierten Kräften für die jeweilige Drehzahl (Tabelle 14) wurde die Drehzahl für die Großausführung von $n = 5,52 \text{ s}^{-1}$ (331 min^{-1}) durch Interpolation ermittelt. Aus den Prognoseergebnissen für die Großausführung, abgeleitet aus den Modellversuchsergebnissen, ergab sich eine mittlere Drehzahl von $n = 322 \text{ min}^{-1}$. Der benötigte Gesamtschub, bestehend aus Düsen- und Propellerschub, weicht um ca. 4 % von den prognostizierten Werten ab. Diese Ergebnisse erscheinen vielversprechend.

$V_{\text{Schiff}} = 5,0 \text{ ms}^{-1}$					
Drehzahl [s ⁻¹]	Widerstand (Inkl. Ruder) [kN]	Propellerschub [kN]	Düsen Schub [kN]	Restkraft [kN]	Drehmoment [kNm]
4,0	54,36	19,93	4,69	-29,74	5,0
4,5	56,25	28,84	6,47	-20,94	6,99
5,0	58,30	38,40	8,63	-11,27	9,14
5,5	60,53	48,85	11,12	-0,56	11,50
6,0	62,75	60,09	14,13	11,47	14,00
6,5	64,14	72,00	17,68	25,54	16,72

Tabelle 14: Ergebnisse Drehzahlvariation Großausführung Tanker

Basierend auf den Modellversuchsergebnissen des Binnentankschiffes lagen für weitere Propulsionspunkte Hochrechnungen in die Großausführung vor. Diese Punkte wurden mit dem CFD-Verfahren modelliert und berechnet.

Die Nachrechnung der prognostizierten Propulsionspunkte zeigt teilweise eine recht gute Übereinstimmung. Bei höheren Geschwindigkeiten sind deutliche Abweichungen zu beobachten, was bedingt sein kann durch den hier vernachlässigten erhöhten Wellenwiderstand.

Deutliche Abweichungen sind bei der Berechnung des Propellerdrehmomentes zu erkennen (Tabelle 15). Eine Abweichung der Beiwerte für das Propellerdrehmoment wurde auch schon bei der Nachrechnung der Freifahrtcharakteristik des Propellers (Seite 29) festgestellt. Anscheinend werden diese Effekte noch durch den in einer Düse arbeitenden Propeller verstärkt.

V_{Schiff} [km/h]	Schub			Widerstand (Inkl. Ruder) [kN]	Restkraft [kN]	Moment [kNm]	Drehzahl [min ⁻¹]
	Propeller [kN]	Düse [kN]	Gesamt [kN]				
14,0	23,78	5,39	29,17	35,92	-6,75	5,67	234,9
16,0	32,09	7,26	39,35	46,91	-7,56	7,63	272,4
18,0	45,90	10,40	56,30	60,20	-3,90	10,8	322,1
19,0	53,72	12,22	65,94	67,20	-1,26	12,64	346,8
20,0	63,95	14,57	78,2	75,10	3,42	15,00	375,8
21,0	76,95	17,70	94,65	83,85	10,8	17,97	409,2

Tabelle 15: Nachrechnung Propulsionsversuch GA Tanker

Die Ermittlung der Propellerdrehmomente über die Schubidentität führte zu höheren Drehmomenten für die entsprechende Drehzahl. Diese Abweichungen können nicht durch die gewählten Vereinfachungen (Vernachlässigung der dynamischen Schwimmlagenänderung, keine Verformung der Wasseroberfläche) erklärt werden.

4.6. Zusammenfassung CFD-Modellierung Propulsionsversuch

Die Vielzahl der numerischen Berechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Verfahren hat gezeigt, dass prinzipiell eine Modellierung des Propulsionsversuches durch CFD-Methoden möglich ist.

Die Verfahren mit dem Kraft-Scheiben-Modell, die anfänglich auf Grund ihrer einfachen Anwendung und kurzen Rechenzeit favorisiert wurden, haben den großen Nachteil, dass die Intensität der Wirkung des Propellers sich nicht aus der Wechselwirkung und den aktuellen im Zustrom zum Propeller auftretenden Geschwindigkeiten ergibt, sondern aus einer separat im numerischen Widerstandsversuch ermittelten mittleren Zustromgeschwindigkeit und den Kraftgrößen aus einem externen Freifahrtprogramm. Diese von „außen“ gelieferten Eingabegrößen können die Wechselwirkung nicht wiedergeben.

Aus diesem Grund und da der zeitliche Aufwand für quasistationäre Berechnungen mit einem realen Propeller deutlich reduziert werden konnte, wurden die ausführlichen Untersuchungen zum Propulsionsversuch mit dem komplexeren Verfahren des realen Propellers durchgeführt.

Die numerischen Freifahrtversuche zeigen, dass noch weitere Arbeiten notwendig sind, um die hier angewandten Methoden zu verbessern, damit eine höhere Genauigkeit bei der Berechnung von Schub und insbesondere Drehmoment am Propeller ermöglicht wird.

Mögliche Ursachen für die Abweichungen im oberen und unteren Fortschrittsgradbereich können die Gitterqualität oder auch die angewandten Turbulenzmodelle sein. Eine höhere Genauigkeit verspricht der Einsatz von Hexaedergittern. Im Rahmen dieses Projektes sollten diese jedoch nicht getestet werden, da die Generierung von Propellergittern mit Hexaedern ohne entsprechende Erfahrung sehr aufwendig ist. Es sollten Verfahren entwickelt werden, die mit Standardmethoden der CFD zu realisieren sind.

Die Analyse der numerischen Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass an der Genauigkeit der Berechnung der integralen Größen durch die angewandten Verfahren weiter gearbeitet werden muss, um eine praxisrelevante Anwendung hinsichtlich der quantitativen Größen zu garantieren.

Die qualitativen Ergebnisse aus den Strömungsberechnungen sind schon jetzt ein wertvoller Beitrag zu Verbesserung der Propulsionsanlage. Sie bieten Erkenntnisse über die Zuströmung zur Antriebsanlage, die experimentell für das Modell nur teilweise mit großem Aufwand lieferbar sind und für die Großausführung nicht zu erhalten sind.

5. Messgerät für Schub und Drehmoment in der Großausführung

In der Literatur [8] werden Methoden zur Messung von Propellerschub und Propellerdrehmoment beschrieben, die auf der Verwendung von Dehnungsmessstreifen basieren. Diese im Grundsatz bekannten und bewährten Techniken sollen genutzt werden, um die als schwierig geltende Messung des Propellerschubs unter Betriebsbedingungen möglich zu machen. Die Schwierigkeit der Messung ergibt sich daraus, dass Dehnungsmessstreifen immer eine elastische Verformung der Probe erfassen. Bei einer massiven Propellerwelle ist diese elastische Verformung durch Schub auf Grund der großen Querschnittsfläche sehr klein.

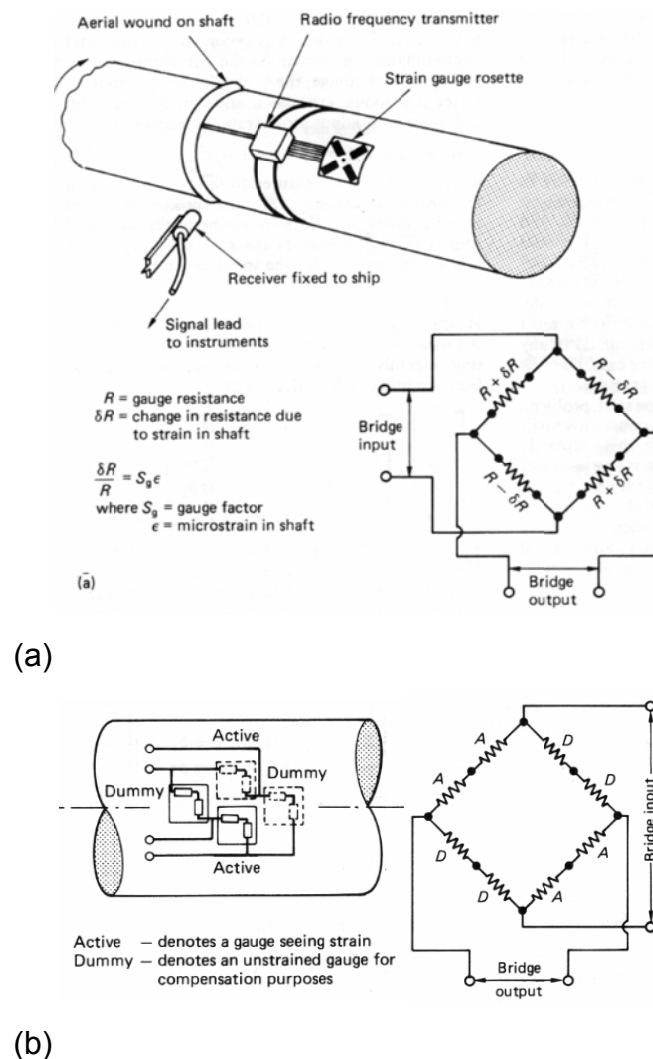


Abbildung 45: Beschreibung der Messung des Drehmoments (a) und der Schubmessung (b) aus [8]

Bisher wird diese Methode der Schubmessung nur in Einzelfällen eingesetzt. Im Bereich der Binnenschifffahrt ist keine Messung dieser Art bekannt. Die Messung des Schubes auf der Propellerwelle gilt als besonders schwierig, weil die Schubspannungen auf der Welle nur ca. 10 % der gleichzeitig auftretenden Torsionsspannungen betragen. Gleichzeitig treten erhebliche Störsignale (z.B. Vibrationen und Biegeschwingungen auf der Welle) auf. So ergibt sich die Notwendigkeit, die schwachen Messwerte mit Schleifringen

oder als Funksignal von der rotierenden Welle auf den stationären Messverstärker zu übertragen. Diese Probleme führten bisher dazu, dass die Schubmessung für die Praxis nur in Ausnahmefällen Anwendung gefunden hat.

Im Rahmen des Vorhabens sollte als Innovation eine Lösung entwickelt werden, die in der Praxis der Berufsschifffahrt eingesetzt werden kann. Die minimalen Änderungen im Widerstand in den auf der Propellerwelle befindlichen Dehnungsmessstreifen (DMS) werden mit Hilfe einer Wheatstone-Brücke erfasst. Ein Messverstärker, der unmittelbar neben den DMS ebenfalls auf der Propellerwelle montiert ist, kann die Auswertung der Messwerte durchführen und die Ergebnisse mit einer drahtlosen digitalen Datenübertragung an die Anlage zur Datenerfassung übergeben. Die Verwendung von modernen Bauelementen der Mikroelektronik in Verbindung mit digitaler drahtloser Datenübertragung soll es möglich machen, unter Praxisbedingungen die Ergebnisse mit der erforderlichen Genauigkeit zu erzielen.

5.1. Entwicklungsschritte

In den ersten Schritten zur Entwicklung des Messgeräts war das Ziel, Druckkräfte und Drehmomente auf einem fest montierten Rohr zu messen. Diese einfache Anordnung konnte verwendet werden, um verschiedene Typen von Dehnungsmessstreifen (DMS) zu testen und den Messverstärker zu erproben.



Abbildung 46: DMS an einem Rohr (links) und einem Rundstahl (rechts)

Zunächst wurde ein Messverstärker des Herstellers MicroStrain verwendet. In dem Gehäuse mit den Abmessungen von ca. 50 mm x 30 mm finden neben der Signalkonditionierung, dem Analog-Digital-Wandler mit Micro-PC und dem Speicherelement auch die 2,4 GHz Funkschnittstelle und eine wieder aufladbare Batterie Platz. Ohmsche Messbrücken, wie Dehnungsmessstreifen, Thermoelemente, Spannungen und Ströme lassen sich mit diesem Gerät direkt erfassen und mit drahtloser digitaler Datenübertragung an die Messwerterfassung übertragen. Mit dieser einfachen Vorrichtung konnten bereits Druckkräfte erfasst und als Messwert aufgezeichnet werden.



Abbildung 47: Messverstärker, ca. in Originalgröße, mit drahtloser digitaler Datenübertragung

Bei diesem Gerät stellte sich bei Erprobungen im Labor heraus, dass die Empfindlichkeit für die Erfassung des Schubes nicht ausreichend für genaue Messungen war. Als problematisch erwies sich auch die Temperaturempfindlichkeit der Anlage. Bereits kleine Temperaturschwanken im Bereich der DMS veränderten stark den Messwert für den Schub. Aus diesen Gründen wurde es so notwendig, einen geeigneten Messverstärker in Eigenarbeit zu entwickeln.

Ein wesentliches Element des neu entwickelten Messverstärkers war die Vorschaltung einer zusätzlichen Verstärkerstufe für die Messung des Schubes und Methoden, die DMS mit deutlich höheren Messspannungen zu versorgen. Auch dieser Messverstärker konnte mit kurzen Drahtverbindungen dicht neben den DMS angebaut werden. Die anschließende digitale und drahtlose Übertragung der Signale vom Verstärker zum Empfänger stellte zu keinem Zeitpunkt ein Problem dar. Hier sorgten die bewährten Module vom Typ XBee für eine einwandfreie Signalübertragung zum Empfänger, der wiederum an eine Messdatenerfassung vom Hersteller HBM angeschlossen war.

Die hier verwendete Anlage kann wie folgt beschrieben werden:

a. Dehnungsmessstreifen (DMS)

Messung der Torsion:

Anordnung der Vollbrücke mit 4 diagonal angeordneten DMS auf einer Seite der Welle.

Typ CEA-06-250US-350, Hersteller Micro-Measurement

Messung der Schubspannung:

4 Elemente, je um 90° versetzt auf der Welle, mit jeweils einem DMS in

tangentialer und in axialer Richtung

Typ 6/350 XY31 Hersteller HBM

- b. Messverstärker
Eigenbau-Chopper-Verstärker
Steuerung über Controller, 2 Kanäle für die Messung von Torsion und Schub
- c. Datenübertragung
Drahtlos digital, XBee Pro S1 Modul, Hersteller Digi
- d. Stromversorgung
4 Stück Lithium-Akkus, Baugröße 18650
- e. Messwerterfassung stationär
MGC plus, Hersteller HBM



Abbildung 48: Messverstärker mit XBee Modul rechts unten

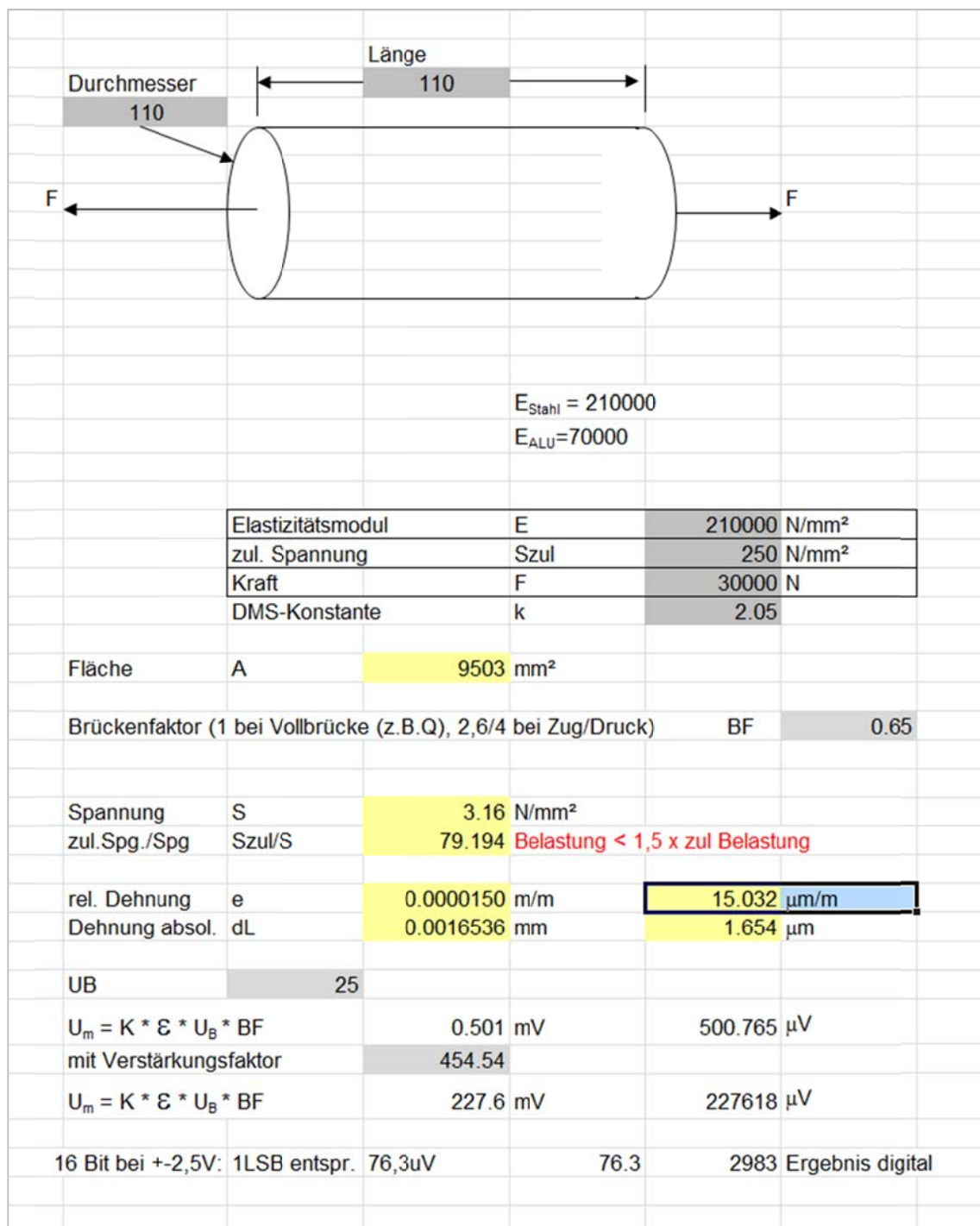


Abbildung 49: Ableitung der Umrechnungswerte

In der Abbildung 49 wird gezeigt, wie die Auslegung des Messverstärkers für die Schubmessung erfolgte. Weitergehende Erläuterungen sind dazu im Abschnitt 2.1 des Handbuchs aus [9] zu ersehen. In diesem Beispiel, mit den für das FGS erwarteten Schubwerten, ergibt sich eine elastische Verformung der Propellerwelle von 15 $\mu\text{m/m}$ und eine digitale Ausgabe des Verstärkers mit dem Wert 2983.

6. Großversuche

Bei den Großversuchen mit Binnenschiffen sollte die Messvorrichtung für Schub und Drehmoment unter Praxisbedingungen erprobt werden und es sollte versucht werden, die aus den Versuchen mit Modellpropellern prognostizierten Leistungsdaten mit der Großausführung der Propeller zu vergleichen.

6.1. Großversuche mit dem FGS „Loreley Elegance“

Die Großversuche mit dem FGS „Loreley Elegance“ wurden am 19. November 2013 durchgeführt. Fahrtrevier war der Rhein im Bereich zwischen Boppard und St. Goar.

Bei einer Wassertiefe von ca. 5,50 m erfolgten zunächst in der Bergfahrt Messungen mit unterschiedlichen Drehzahlen. Nach dem Wendemanöver wurden in der anschließenden Talfahrt an den entsprechenden Ortslagen jeweils die Drehzahlen wie in der Bergfahrt eingestellt. Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass für jede Drehzahlstufe möglichst ähnliche Bedingungen in Bezug auf die Wassertiefe, das lokale Gefälle und die Strömung vorherrschten.



Abbildung 50: Propellerwelle mit den ersten DMS (links) und dem Messverstärker (rechts)

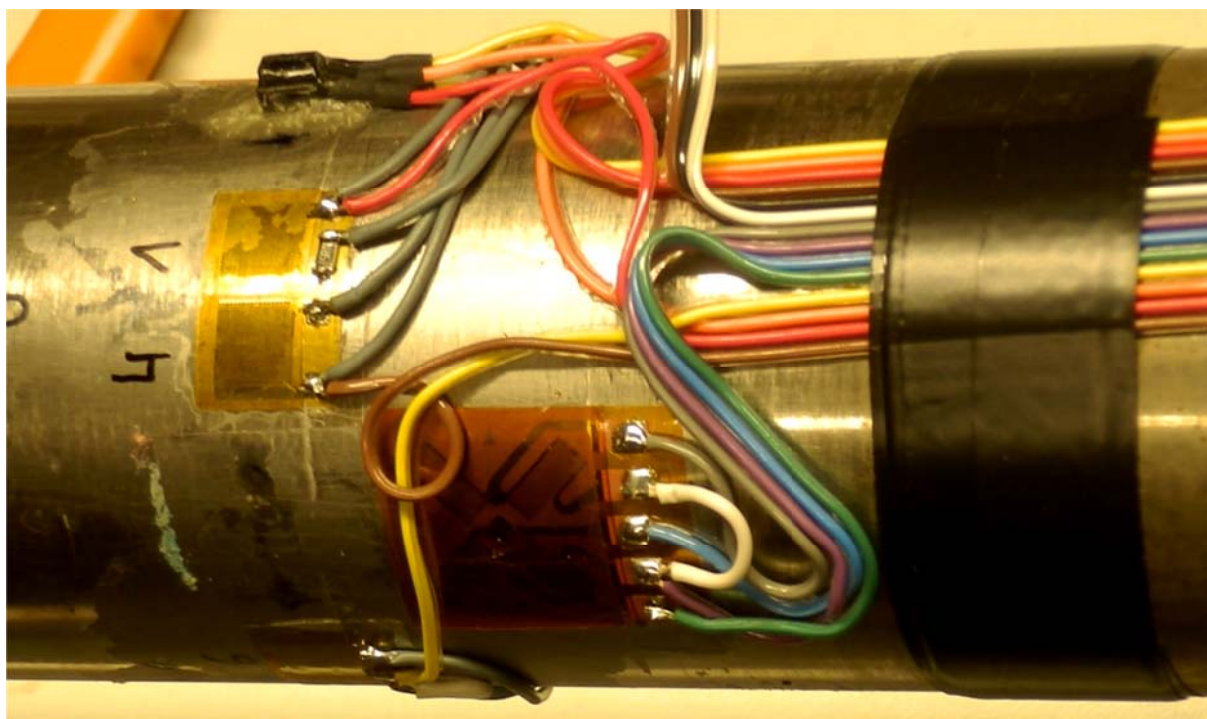


Abbildung 51: Fertig verdrahtete DMS auf der Propellerwelle

Das Schiff ist mit 2 Propellern ausgestattet, in diesem Fall wurde die Messung auf der Backbord-seitigen Propellerwelle durchgeführt.

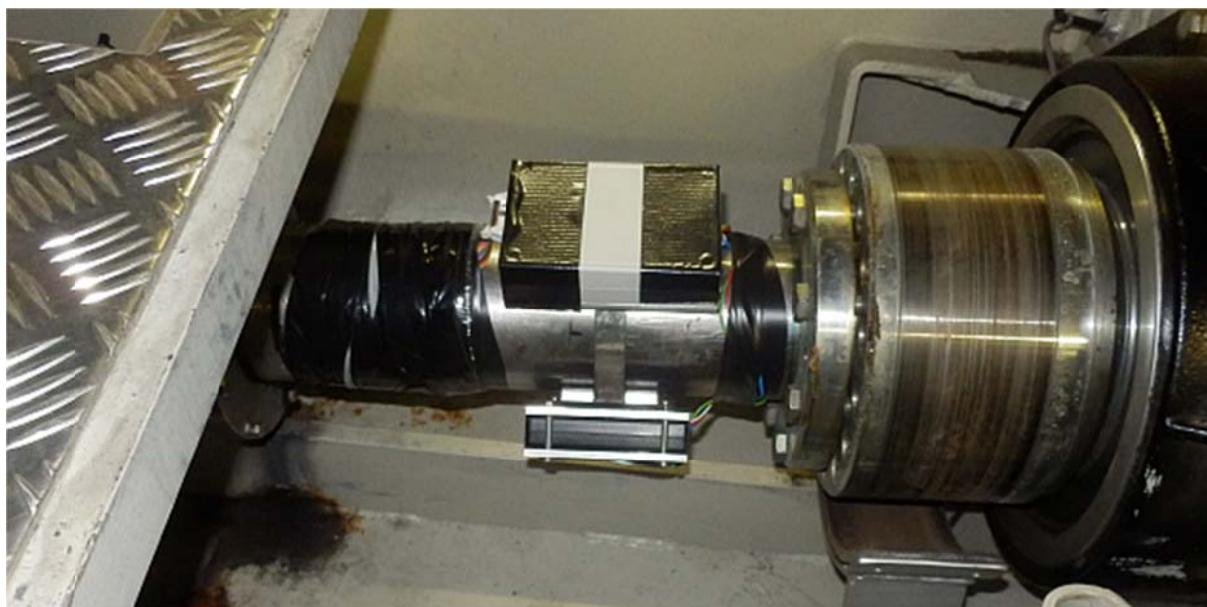


Abbildung 52: Propellerwelle mit DMS (abgedeckt links) und dem Messverstärker mit Batterien (rechts)



Abbildung 53: Mess-Station mit Empfänger (rechts oben), Datenerfassung und Aufzeichnung auf Laptop



Abbildung 54: Auswertung an Bord – Schubwerte in Rot

Die Mess-Station speicherte die Messungen mit 10 Messwerten pro Sekunde. Diese Datensätze enthielten jeweils:

- Uhrzeit
- Schub T auf der Propellerwelle
- Drehmoment Q auf der Propellerwelle

Parallel dazu wurden im Steuerhaus die folgenden Daten in einem von Hand geführten Protokoll aufgezeichnet:

- Uhrzeit
- Motordrehzahl als Anzeige auf dem Steuerpult
- Motor-Treibstoffverbrauch als Anzeige auf dem Steuerpult
- Ortslage, Fahrtbedingungen und Manöver des Schiffes

Um die Messreihen auswerten zu können, wurden anschließend die folgenden Schritte durchgeführt:

- Umformatierung als XLS-Tabelle.
- Die Messreihen erhielten eine gemeinsame chronologische Zeitachse und wurden zu einer Datei zusammengefasst. Diese Datei enthält 129,000 Zeilen mit Messwerten.
- Die Messwerte für den Schub T zeigten häufig und in regelmäßigen Abständen sehr deutliche „Ausreißer“ nach oben und unten, die wahrscheinlich auf einen Fehler in der Datenübertragung zurückzuführen sind. Die punktuellen „Ausreißer“ wurden mit Excel-Makro erfasst und gelöscht.

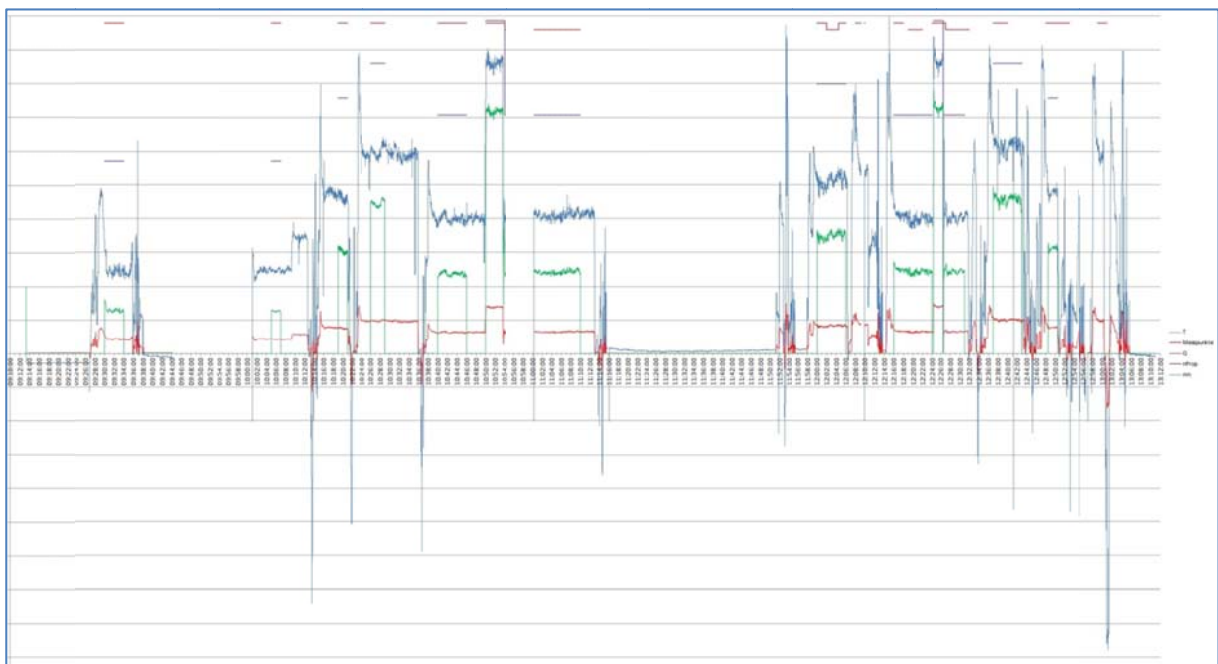


Abbildung 55: Zeitschrieb der Messergebnisse aus den Großversuchen mit dem FGS „Loreley Elegance“

			Anzeige Verbrauch abgelesen	Drehzahl Motor abgelesen	Geschwindigkeit über Grund gemessen	Leistung geschätzt ^{*)} nach Verbrauch	Drehzahl Propeller
Beginn	Ende	Fahrt	l/h	1/min	km/h	kW	1/s
09:33	09:36	zu Tal	19	1130	19,7	71	4,77
10:06	10:13	zu Berg	20	1130	10,1	73	4,77
10:45	10:50	zu Berg	34	1400	11,9	127	5,90
11:09	11:15	zu Berg	35	1400	11,3	131	5,90
10:20	10:21	zu Berg	44	1500	13,2	165	6,33
12:01	12:02	zu Berg	48	1580	14,0	180	6,66
12:02	12:04	zu Berg	48	1580	12,0	180	6,66
12:05	12:06	zu Berg	48	1580	12,1	180	6,66
10:28	10:37	zu Berg	60	1700	16,0	225	7,17
10:50	10:53	zu Berg	135	1950	14,7	506	8,22
12:17	12:19	zu Tal	38	1400	25,6	142	5,90
12:21	12:24	zu Tal	38	1400	25,3	142	5,90
12:31	12:32	zu Tal	35	1400	24,4	131	5,90
12:52	12:56	zu Tal	44	1500	24,4	165	6,33
12:39	12:43	zu Tal	68	1700	27,4	255	7,17
12:26	12:27	zu Tal	135	1950	28,9	506	8,22

Tabelle 16: Daten zu den Messungen auf dem FGS „Loreley Elegance“

^{*)} Aus der abgelesenen Verbrauchsrate des Motors in l/h konnte die jeweilige Motorleistung unter der Annahme eines spezifischen Verbrauchs von 220 gr/kWh abgeleitet werden.

Messergebnisse für das FGS „Loreley Elegance“

Zu jedem Fahrtabschnitt konnten die entsprechenden Werte für auf der Propellerwelle gemessenen Schub und Drehmoment zugeordnet werden.

Beginn hh:mm:ss		Geschw. gg. Grund m/s	Drehzahl n 1/s	Schub T kN	Drehmoment Q kNm	Leistung P _D kW
09:33	zu Tal	5,47	4,77	13,01	2,11	63
			-			
10:06	zu Berg	2,81	4,77	12,73	2,14	64
10:45	zu Berg	3,31	5,90	19,54	3,20	119
11:09	zu Berg	3,14	5,90	19,80	3,27	121
10:20	zu Berg	3,67	6,33	23,40	3,86	153
12:01	zu Berg	3,89	6,66	23,32	4,06	170
12:02	zu Berg	3,33	6,66	24,06	4,17	175
12:05	zu Berg	3,36	6,66	24,15	4,15	174
10:28	zu Berg	4,44	7,17	29,36	4,82	217
10:50	zu Berg	4,08	8,22	42,54	6,95	359
12:17	zu Tal	7,11	5,90	18,56	3,35	124
12:21	zu Tal	7,03	5,90	18,16	3,30	123
12:31	zu Tal	6,78	5,90	18,78	3,40	126
12:52	zu Tal	6,78	6,33	21,64	3,93	156
12:39	zu Tal	7,61	7,17	28,56	5,08	229
12:26	zu Tal	8,03	8,22	34,12	5,88	304

Tabelle 17: Messergebnisse mit dem FGS „Loreley Elegance“

Die Darstellung der Geschwindigkeit im Steuerhaus basierte auf einer Messung per GPS und zeigte dementsprechend die Geschwindigkeit des Schiffes „gegen Grund“ an.

Auswertung der Ergebnisse für das FGS „Loreley Elegance“

Eine erste Analyse der Messergebnisse für die Leistung am Propeller zeigte bei höheren Drehzahlen einen deutlichen Unterschied zwischen der Leistung, die über den angezeigten Brennstoffverbrauch ermittelt wurde, und der an der Propellerwelle gemessenen Leistung (siehe Abbildung 56). Hier ist zu vermuten, dass die Anzeige des Brennstoffverbrauchs im Steuerhaus bei höheren Drehzahlen eine Missweisung aufweist, weil sie möglicherweise in Abhängigkeit von der Drehzahl und/oder anderer Motorparameter ermittelt wird und nicht auf einer echten volumenmetrischen Messung basiert.

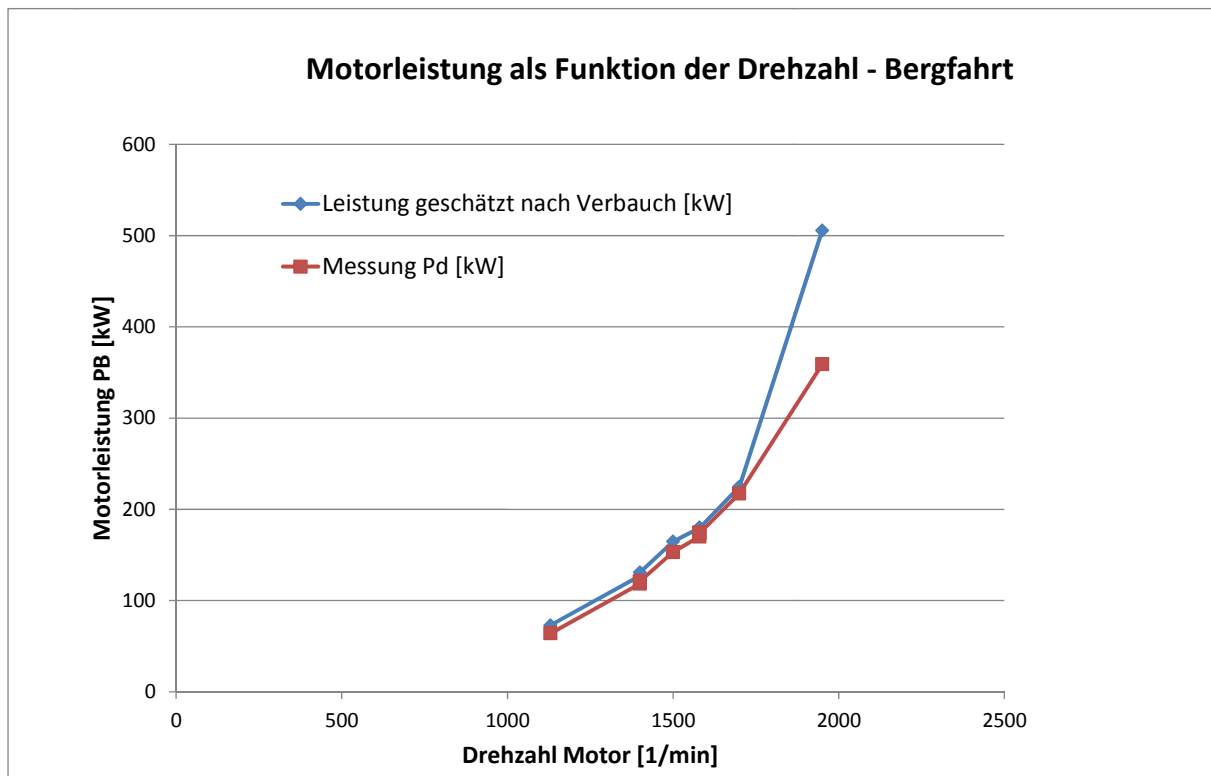


Abbildung 56: Leistungsmessung über den Verbrauch bzw. auf der Propellerwelle

Nach der Durchführung der Großversuche lagen die Messergebnisse, zusammengefasst wie in Tabelle 17, vor. Bei der bekannten Größe des Propellerdurchmessers D_P können mit diesen Daten die dimensionslosen Beiwerte K_T und K_Q berechnet werden.

Drehmomentbeiwert K_Q

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \times n^2 \times D^5}$$

Schubbeiwert K_T

$$K_T = \frac{T_P}{\rho \times n^2 \times D^4}$$

Fortschrittszahl J :

$$J = \frac{V_A}{n \times D}$$

Eine direkte Bestimmung der Fortschrittszahl J ist mit den Messergebnissen nicht möglich, weil die Geschwindigkeit des Schiffes „gegen Wasser“ nicht gemessen werden konnte, ebenso wenig wie die Fortschrittsgeschwindigkeit V_A des Propellers gegen das Wasser. Diese Kennwerte K_T und K_Q können aber mit den vom Hersteller berechneten Kennlinien des Propellers verglichen werden, um so festzustellen, mit welcher Fortschrittszahl J der Propeller während der Messung gearbeitet hat. Hier kann iterativ ermittelt werden, bei welcher Fortschrittszahl J der Wert für K_T aus der Messung genau auf der Kennlinie des Propellers liegt.

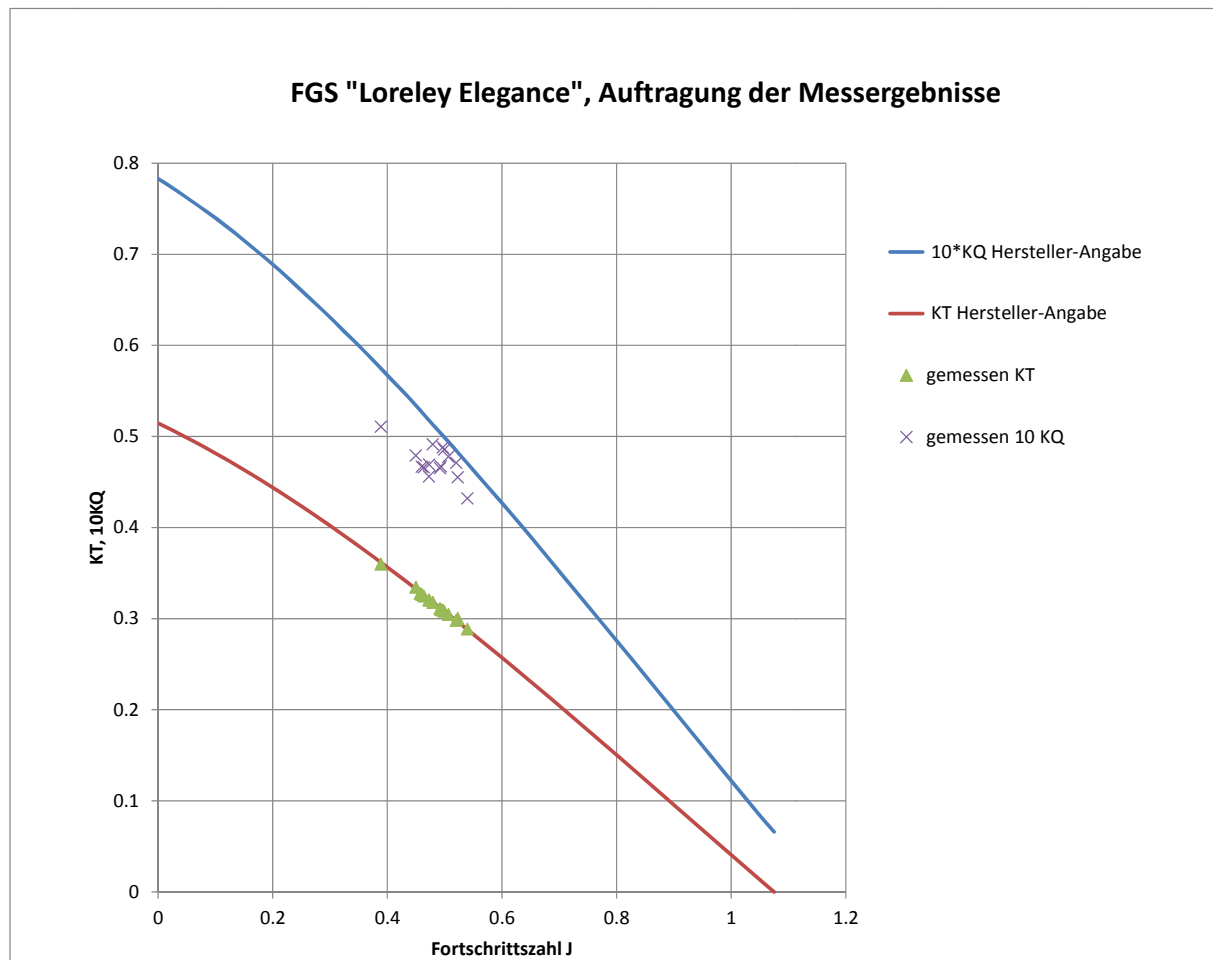


Abbildung 57: Auftragung der Messergebnisse für FGS „Loreley Elegance“

In Abbildung 57 ist zu erkennen, dass alle Messungen in einem schmalen Bereich der Fortschrittszahl liegen. Bei den Werten für K_Q aus der Messung liegen die Ergebnisse deutlich unterhalb der Kennlinie, die sich aus den Berechnungen des Herstellers ergeben hatte.

Bei genauerer Analyse (Abbildung 58) zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Ergebnissen aus der Bergfahrt und der Talfahrt. Die in der Bergfahrt (gegen die Strömung des Flusses) gemessenen Werte für K_Q liegen deutlich niedriger als die entsprechenden Werten in der Talfahrt.

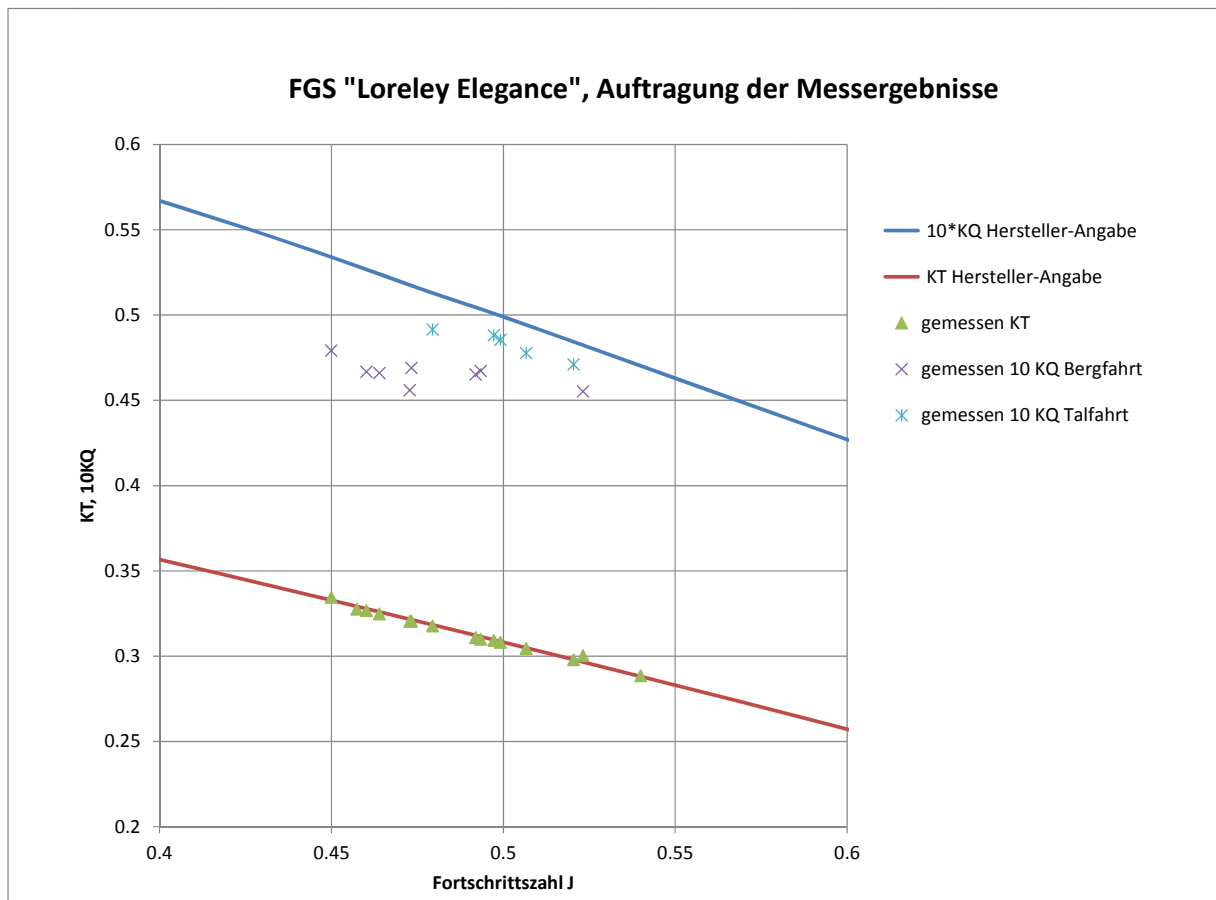


Abbildung 58: Messergebnisse für FGS „Loreley Elegance“ separat für die Berg- und Talfahrt

Mit den Messwerten für die Berg- und Talfahrt bei gleicher Drehzahl kann der Einfluss der Strömung auf die Kennwerte durch die Bildung von Mittelwerten (Tabelle 18) zumindest annäherungsweise herausgerechnet werden.

Geschw. gg. Grund m/s	Drehzahl n 1/s	Schub T kN	Drehmoment Q kNm	Leistung P_D kW
5,47	5,90	18,97	3,30	123
5,22	6,33	22,52	3,89	155
6,03	7,17	28,96	4,95	223
6,06	8,22	38,33	6,41	331

Tabelle 18: Mittelwerte aus Berg- und Talfahrt für das FGS „Loreley Elegance“

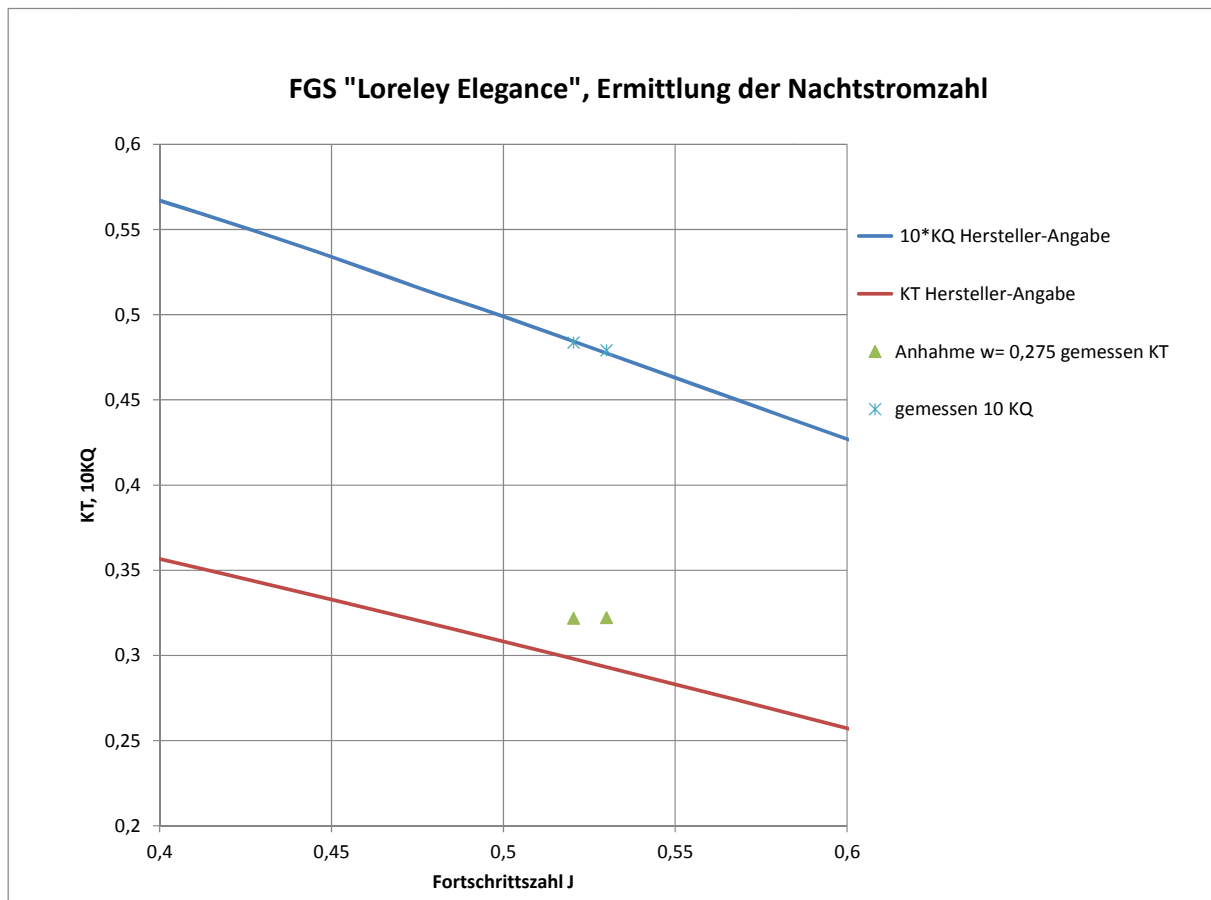


Abbildung 59: Aus Berg- und Talfahrt gemittelte Ergebnisse für das FGS „Loreley Elegance“

In der Abbildung 59 sind die Ergebnisse für die Mittelwerte von K_T und $10K_Q$ aufgetragen. Unter der Annahme einer Nachstromzahl von $w = 0,275$, liegen die Werte für $10K_Q$ genau auf der Kennlinie, während der K_T -Wert etwas höher als erwartet liegt. Die so ermittelte Nachstromzahl von $w = 0,275$ entspricht gut den aus Erfahrungswerten bzw. Modellversuchen erwarteten Werten für diesen Schiffstyp.

6.2. Großversuche mit dem TMS „EVENTUS“

Die Großversuche mit dem TMS „EVENTUS“ wurden am 13. Februar 2014 durchgeführt. Fahrtrevier war hier der Rhein im Bereich zwischen Duisburg-Ruhrort und Krefeld.

Bei einer Wassertiefe von $h = \text{ca } 5,5 \text{ m}$ und mit einem gleichlastigen Tiefgang von $T = 2,10 \text{ m}$ erfolgten zunächst in der Bergfahrt Messungen mit unterschiedlichen Drehzahlen. Nach dem Wendemanöver wurden in der anschließenden Talfahrt an den entsprechenden Ortstagen jeweils die Drehzahlen wie in der Bergfahrt eingestellt. Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass für jede Drehzahlstufe möglichst ähnliche Bedingungen in Bezug auf die Wassertiefe, das lokale Gefälle und die Strömung vorherrschten.

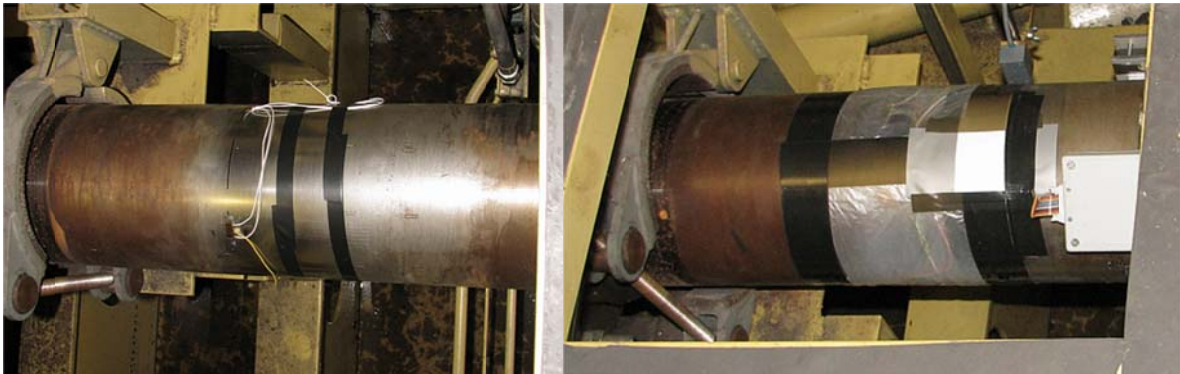


Abbildung 60: Propellerwelle mit DMS (links) und dem Messverstärker (rechts)

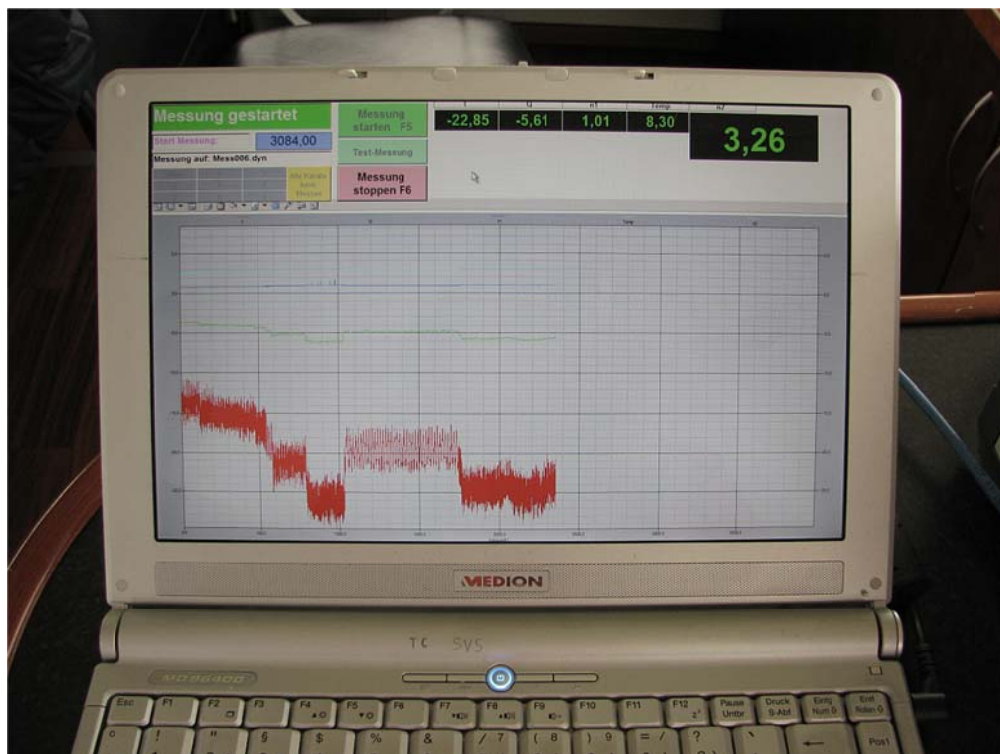


Abbildung 61: Aufzeichnung an Bord – Schubwerte in Rot

Im Vergleich zu den Messungen auf dem FGS war die Vorrichtung in einigen Punkten verbessert worden. Insbesondere die Ermittlung der Drehzahl erfolgte jetzt direkt mit einer Messung auf der Propellerwelle. Die gleichzeitige Aufzeichnung aller Werte machte die Ergänzung der Messdaten mit von Hand aufgezeichneten Daten überflüssig, nur die Ortslage, Fahrtbedingungen und Manöver des Schiffes wurden manuell protokolliert.

Die Mess-Station speicherte die Messungen mit 5 Messwerten pro Sekunde. Die Datensätze enthielten jeweils:

- Uhrzeit
- Schub T auf der Propellerwelle
- Drehmoment Q auf der Propellerwelle
- Drehzahl

Parallel dazu wurden im Steuerhaus die folgenden Daten in einem von Hand geführten Protokoll aufgezeichnet:

- Uhrzeit
- Motordrehzahl als Anzeige auf dem Steuerpult
- Ortslage mit GPS-Daten, Fahrtbedingungen und Manöver des Schiffes

Um die Messreihen auswerten zu können, wurden die Messwerte in eine Excel-Tabelle mit ca. 56.000 Zeilen überführt.

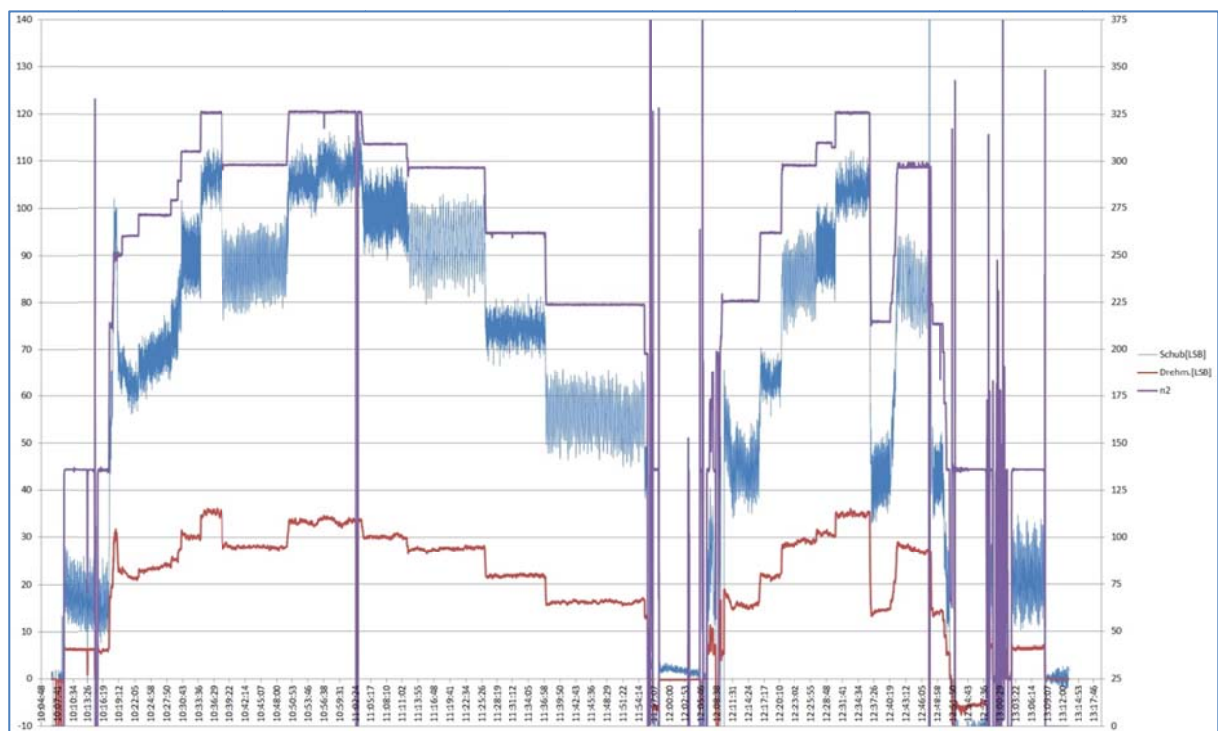


Abbildung 62: Zeitschrieb der Messergebnisse aus den Großversuchen mit dem TMS „EVENTUS“

Messergebnisse für das TMS „EVENTUS“

Zeitpunkt	Geschw.	Drehzahl	Schub	Moment	Leistung
	gg. Grund	n	T	Q	PD
Beginn	m/s	1/sec	kN	kNm	kW
Bergfahrt					
10:46	3,17	4,97	87,56	27,99	873
10:50	3,61	5,43	106,92	33,36	1139
11:06	3,22	5,15	99,94	30,29	980
11:13	3,14	4,93	90,19	26,88	833
11:32	2,56	4,35	74,40	21,81	596
11:45	2,08	3,73	55,94	16,21	380
Talfahrt					
12:13	5,89	3,75	47,03	16,11	380
12:17	6,53	4,35	63,44	21,53	588
12:22	6,83	4,95	85,30	28,89	899
12:43	7,11	5,15	91,40	31,00	1003
12:27	7,33	5,43	102,57	34,49	1177
12:30	7,06	4,98	84,40	27,80	870

Tabelle 19: Messergebnisse mit dem TMS „EVENTUS“

Auswertung der Ergebnisse für das TMS „EVENTUS“

Nach der Durchführung der Großversuche lagen für das TMS die Messergebnisse, zusammengefasst in Tabelle 19, vor. Bei der bekannten Größe des Propellerdurchmessers D_P konnten auch hier mit diesen Daten die dimensionslosen Beiwerte K_{TP} und K_Q berechnet werden. Dabei war zu beachten, dass der gleichzeitig einwirkende Schub der Propellerdüse bei den Messungen nicht erfasst werden konnte.

Auch bei dem TMS konnte die Fortschrittszahl J im Großversuch nicht direkt ermittelt werden. Die Kennwerte K_{TP} und K_Q können aber mit den vom Hersteller berechneten Kennlinien des Propellers verglichen werden, um so festzustellen, mit welcher Fortschrittszahl J der Propeller während der Messung gearbeitet hat. Bei der Auswertung für das TMS wurden die gemessenen Werte vom Drehmomentbeiwert K_Q mit den Angaben des Herstellers verglichen, um so die Fortschrittszahl J zu ermitteln.

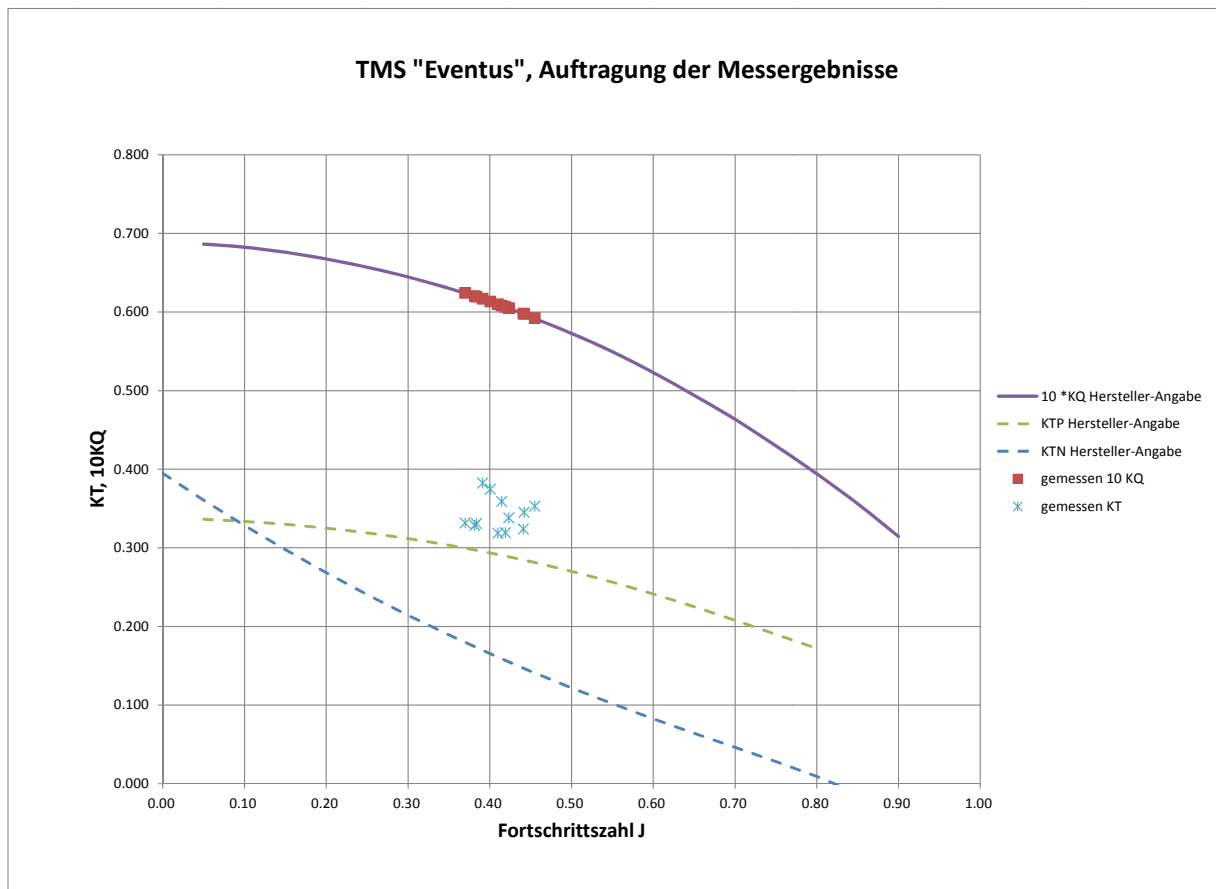


Abbildung 63: Auftragung der Messergebnisse für TMS „EVENTUS“

In Abbildung 63 ist zu erkennen, dass alle Messungen in einem schmalen Bereich für die Fortschrittszahl liegen. Bei den gleichzeitig aufgetragenen Werten für K_T aus der Messung liegen alle Ergebnisse oberhalb der Kennlinie, die sich aus den Berechnungen des Herstellers ergeben hatte.

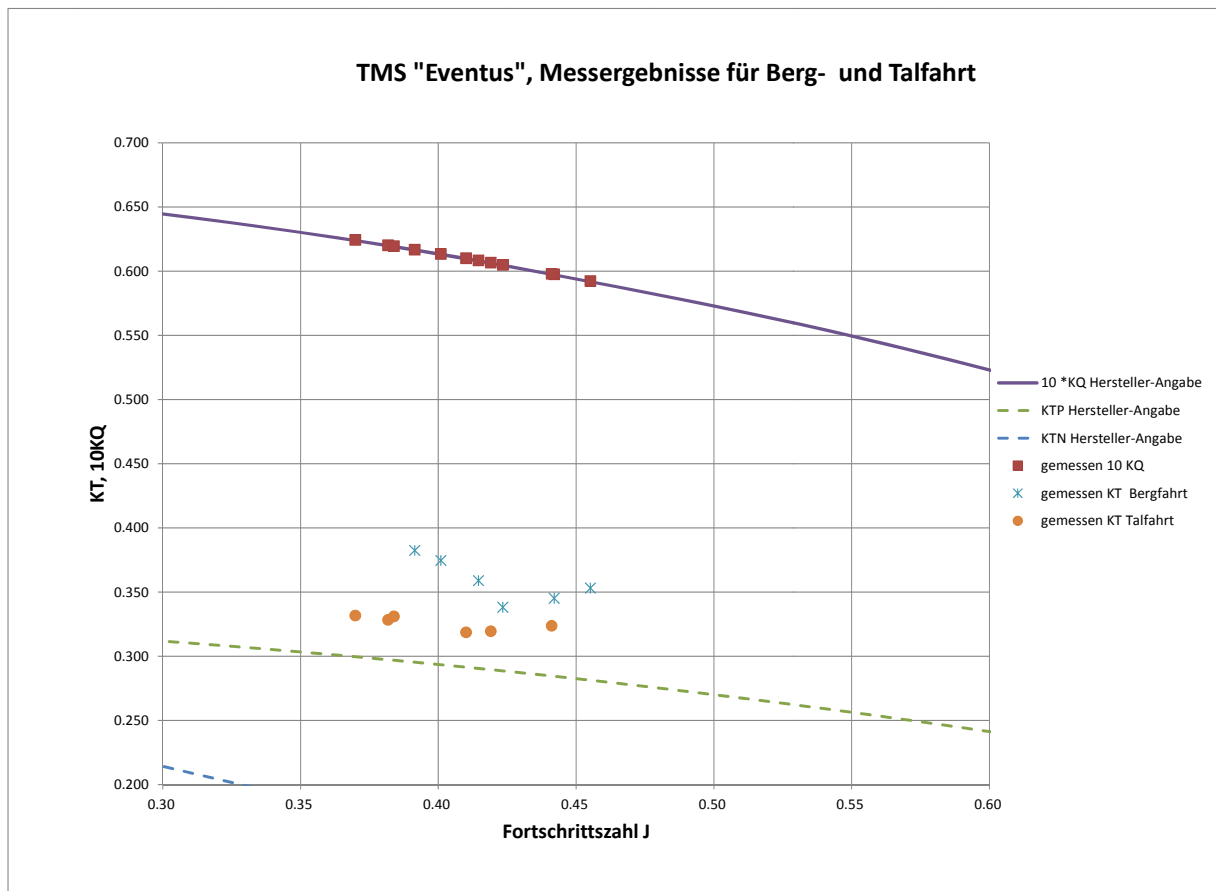


Abbildung 64: Detaillierte Messergebnisse für TMS „EVENTUS“

Die relativ große Streuung für die K_T -Werte in Abbildung 63 ergibt sich bei genauerer Analyse (Abbildung 58) aus den Unterschieden zwischen den Ergebnissen aus der Berg- und Talfahrt. Die gemessenen Werte für K_T sind für die Bergfahrt im Trend höher als in der Talfahrt.

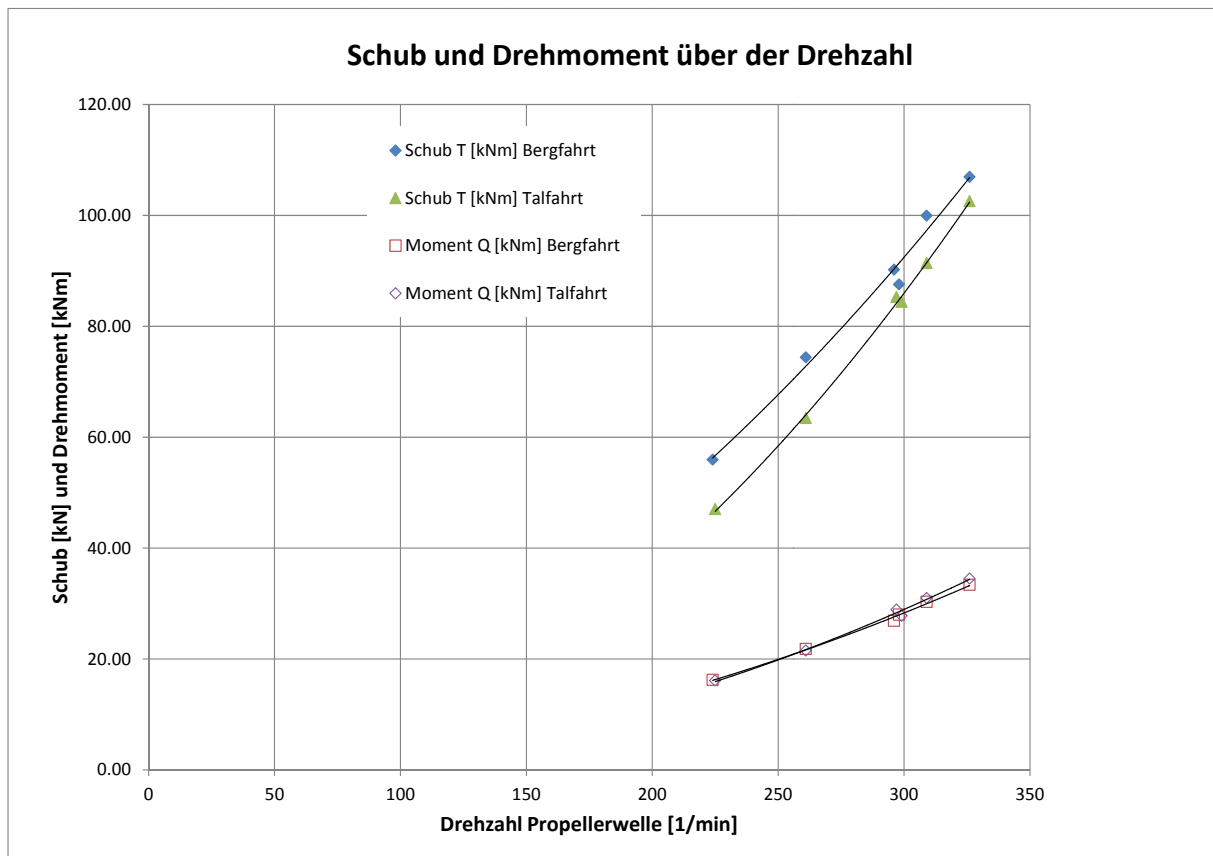


Abbildung 65: Messergebnisse Schub und Drehmoment für TMS „EVENTUS“

Auch bei den absoluten Werten ist dieser Unterschied zwischen Berg- und Talfahrt gut nachzuvollziehen. Bezogen auf die Drehzahl, zeigt sich ein höherer Propellerschub in der Bergfahrt, ohne dass dabei ein vergrößertes Drehmoment bzw. eine höhere Leistung abgefordert wird. Dieser Einfluss der Berg- und Talfahrt auf die Schubwirkung des Propellers beruht möglicherweise auf einer Interaktion zwischen der Gewässersohle und dem Schiff und einer unterschiedlichen Propelleranströmung.

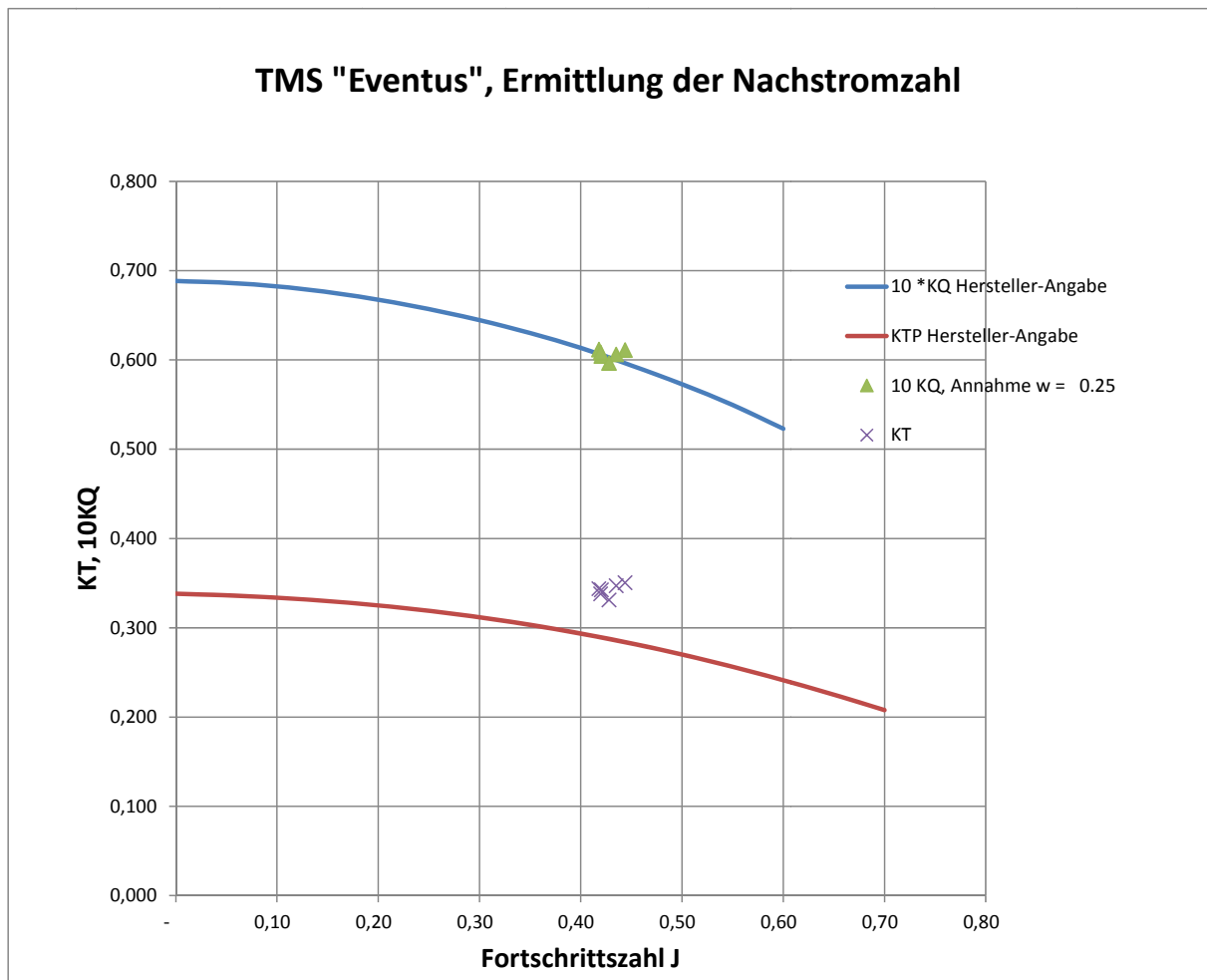


Abbildung 66: Ermittlung der Nachstromzahl für TMS „EVENTUS“

Mit den Messwerten für die Berg- und Talfahrt bei gleicher Drehzahl kann auch für das TMS „EVENTUS“ der Einfluss der Strömung auf die Kennwerte durch die Bildung von Mittelwerten (Tabelle 20) zumindest annäherungsweise herausgerechnet werden.

Geschw.	Drehzahl	Schub	Moment	Leistung
gg. Grund	n	T	Q	PD
m/s	1/sec	kN	kNm	kW
5.47	5.43	104.75	33.93	1139
5.17	5.15	95.67	30.65	980
4.99	4.94	87.75	27.89	833
4.54	4.35	68.92	21.67	734

Tabelle 20: Mittelwerte für Berg- und Talfahrt für TMS „EVENTUS“

In der Abbildung 66 sind die Ergebnisse für die Mittelwerte von K_T und $10K_Q$ aufgetragen. Unter der Annahme einer Nachstromzahl von $w = 0,25$, liegen die Werte für $10K_Q$ genau auf der Kennlinie, während der K_T -Wert etwas höher als erwartet liegt. Die so ermittelte Nachstromzahl von $w = 0,25$ (bezogen auf die Propellerebene) bestätigt die aus

Erfahrungswerten bzw. Modellversuchen erwarteten Werte für diesen Schiffstyp bei der Verwendung eines Propellers mit Düse.

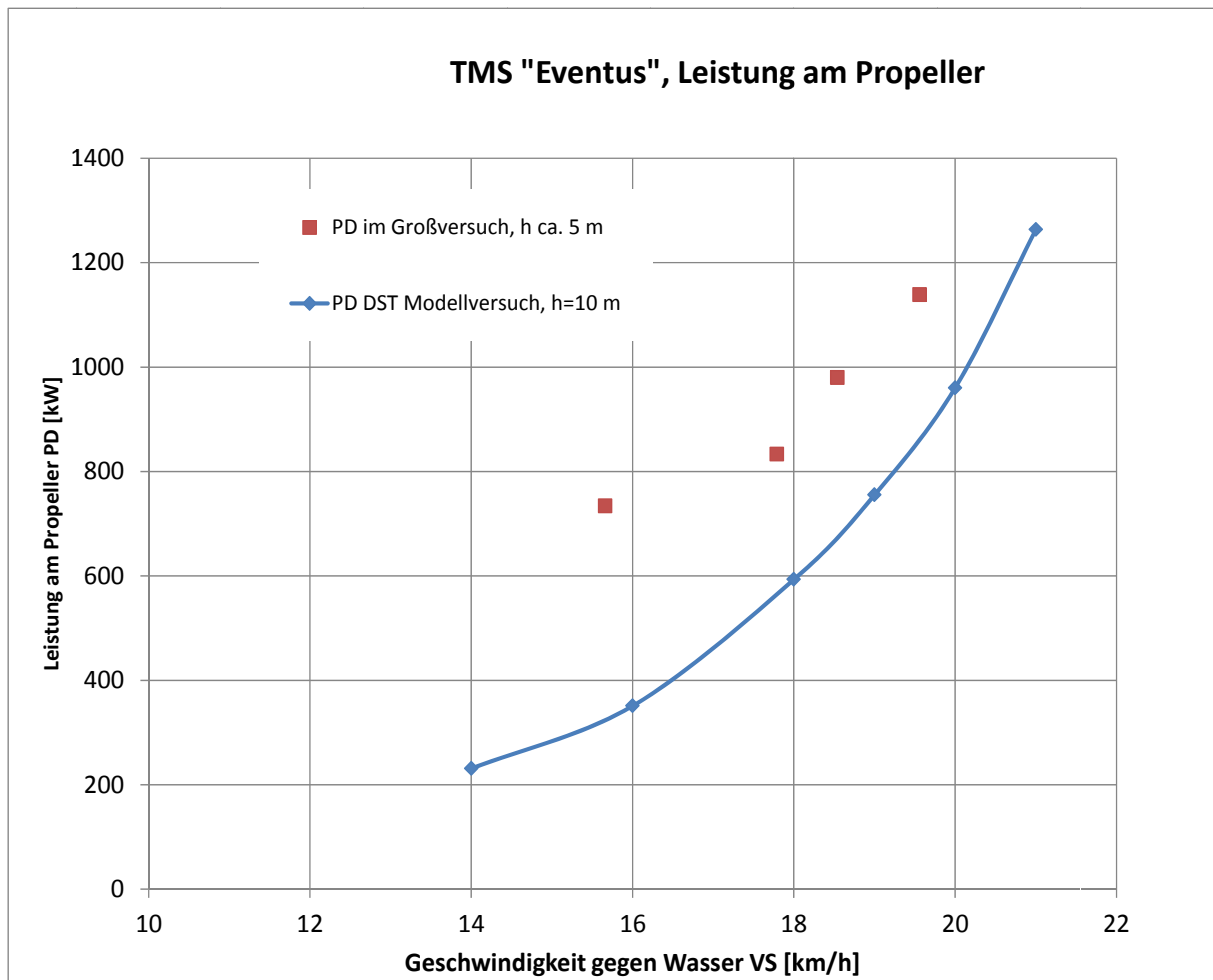


Abbildung 67: Vergleich Prognose aus den Modellversuchen mit dem Großversuch

Bei den Modellversuchen mit dem TMS gibt es Ergebnisse für den Tiefgang von 2,10 m bei einer Wassertiefe von 10,0 m. Ein Vergleich dieser Prognose mit dem Großversuch ergibt eine gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 67), wenn man die unterschiedliche Wassertiefe berücksichtigt.

6.3. Bewertung der Großversuche

Grundsätzlich ist es als Erfolg und technischer Fortschritt zu bewerten, dass es möglich war, gleichzeitig den Schub und das Drehmoment auf einer Propellerwelle zu messen. Die einwandfreie Funktion von

- Krafterfassung durch Dehnungsmessstreifen
- integrierten Messverstärkern auf der Propellerwelle
- digitaler drahtloser Datenübertragung

konnte nachgewiesen werden.

Bei den Ergebnissen zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den Propellerkennwerten, die bei dem Entwurf der jeweiligen Propeller verwendet wurden und der Prognose aus Modellversuchen. Dabei ist wichtig, dass die Messwerte zumindest im Trend den Kennlinien folgen, auch wenn ein bestimmter „Offset“ zu der Kennlinie besteht. Die Einsatzbedingungen des Schiffes wirken sich offensichtlich stark auf die Wirkung des Propellers aus. Dies ist in den Unterschieden bei „Bergfahrt“ und „Talfahrt“ zu erkennen.

7. Diskussion und Ausblick

Die Berechnungen mit CFD-Methoden und auch Großversuche bilden jeweils nur einen Punkt im Feld der verschiedenen Einsatzbedingungen des Schiffes ab. Dies mag bei Seeschiffen unproblematisch sein, da diese Schiffe mit wenigen, genau definierten Parametern von Wassertiefe, Tiefgang und Geschwindigkeit betrieben werden und genau dieser Einsatzfall optimiert werden kann.

Bei den Binnenschiffen ist diese Optimierung wesentlich schwieriger, da eine Vielzahl von Einsatzbedingungen zu berücksichtigen ist und auch die Schiffsformen sich stark voneinander unterscheiden. Im Rahmen der Bearbeitung von VeriProp ist diese Streuung besonders stark aufgefallen. Beispielsweise ist der Einfluss von Berg- und Talfahrt auf die Schubwirkung des Propellers deutlich geworden, der möglicherweise auf einer Interaktion zwischen der Gewässersohle und dem Schiff beruht.

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten umfangreichen CFD-Berechnungen haben es ermöglicht, erstmals für Binnenschiffe einen Propulsionsversuch numerisch zu simulieren und so ein wesentlich besseres Bild von der Wirkung der Propulsionsanlagen zu gewinnen.

Es wird von großem Interesse sein, hier im Rahmen von zusätzlichen Untersuchungen mehr Daten im Großversuch zu erfassen und mit den Ergebnissen aus numerischen Berechnungen zu vergleichen. Eine bessere Datenbasis ist auch für die K_T/K_Q Kennlinien der jetzt gebräuchlichen Kombinationen von Propellern und Düsen erforderlich, da diese bisher nicht vollständig vorliegen. Gerade in der aktuellen Diskussion um die Verbesserung der Energieeffizienz von Schiffsantrieben ist hier eine größere Datenbasis erforderlich.

Die angestrebten Forschungsergebnisse

- Anwendung von numerischen Berechnungen (CFD) für die Auslegung von hochbelasteten Propulsionsanlagen
 - Verbesserung der Messinstrumente, die zur Bestimmung des Wirkungsgrades von hochbelasteten Propulsionsanlagen in der Großausführung erforderlich sind
 - Abgleich zwischen den Berechnungsergebnissen und den Daten der Großausführung
- konnten im Rahmen des Vorhabens VeriProp erreicht werden. Eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades der Propulsionsanlagen für Binnenschiffe kann erwartet werden, wenn weitere Untersuchungen zur Verbreiterung der Datenbasis durchgeführt werden.

7.1. Ergebnistransfer

7.1.1 Nutzen für KMU

Das neu entwickelte Messgerät ist von großer Bedeutung für die Entwicklung der Propulsionsanlagen bei Binnenschiffen, da zum ersten Mal eine direkte Messung des Propellerschubes möglich wird. Besonders geeignet für die Anwendung in der Praxis wird das Messgerät durch den Umstand, dass keine Umbauten an der Propellerwelle erforderlich sind. Auch die Möglichkeit, Aufzeichnungen über einen langen Zeitraum von Tagen und Wochen durchzuführen, wird es erlauben, wertvolle Daten über die Funktion des Schiffsantriebs mit vertretbarem Aufwand zu gewinnen. Wenn es unter Betriebsbedingungen möglich ist, auf der Propellerwelle den Schub und das Drehmoment zusammen mit der Drehzahl zu messen, wird es möglich sein, die Energieeffizienz des Propellers zu bestimmen, ein Verbesserungspotential zu identifizieren und auch die Entwurfsparameter für den Propeller zu verifizieren. Davon profitieren in erster Linie die Anbieter von Propellern und Propulsionsanlagen, aber indirekt auch die Schiffsbetreiber, wie auch die Werften und Spediteure.

Die dargestellten umfangreichen numerischen Methoden sind schon jetzt ein wertvoller Beitrag zu Verbesserung der Propulsionsanlage. Sie bieten Erkenntnisse über die Zuströmung zur Antriebsanlage, die experimentell für das Modell nur teilweise mit großem Aufwand lieferbar sind und für die Großausführung anders nicht zu erhalten sind.

Insbesondere im Bereich der Binnenschifffahrt können die Erweiterung der Entwurfsgrundlagen und die Verifizierung des Entwurfes dazu führen, dass Propulsionsanlagen mit höherer Effizienz entworfen werden können und dass die unter Betriebsbedingungen erzielten energetischen Wirkungsgrade verbessert werden. Es sollten Verbesserungen möglich sein, die den Treibstoffverbrauch um ca. 5 % bis 10 % reduzieren können.

7.1.2 Veröffentlichungen

Nach Abschluss des Vorhabens wird ein zusammenfassender Bericht auf der Internetseite des DST veröffentlicht.

7.1.3 Schutzrechte

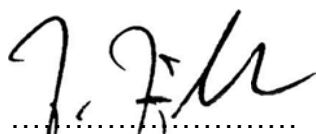
Für die in diesem Vorhaben entwickelten Verfahren und für die Entwicklung des Messgerätes werden keine Schutzrechte beantragt.

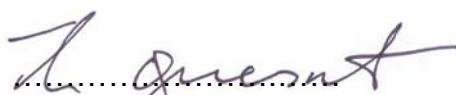
7.1.4 Transferkonzept

Maßnahme	Ziel	Bemerkung	Termin
A: Projektbegleitender Ausschuss Eine Werft konnte als weiteres Mitglied im PbA gewonnen werden, weil dort ein großes Interesse an verbesserter Betriebsdaten-Erfassung besteht.	Die Vorgehensweise und die Ergebnisse des Vorhabens wurden im PA umfassend dargestellt und diskutiert.	A3: Besprechung der Ergebnisse Großversuche, Diskussion nach Abschluss der Auswertungen, Strategie zur Veröffentlichung der Ergebnisse	März 2014
B: Wissenschaftlich-Technischer Ausschuss des DST	Information von Multiplikatoren im Gewerbe	Information über das laufende Projekt	März 2014
C: Fachpresse	Information an das Fachpublikum über das laufende Vorhaben	Pressemitteilungen mit Hinweis auf die Internet-Veröffentlichung an die Zeitschriften „Binnenschifffahrt“ (Hamburg) „Schifffahrt Hafen Bahn und Technik (St. Augustin) „Schuettevaar“ (Niederlande) „Hansa“ (Hamburg)	geplant Oktober 2014
D: Internetseite des DST	Information an das Fachpublikum über das laufende Vorhaben	Darstellung des aktuellen Stands im laufenden Projekt	August 2014

Duisburg, 14.07.2014
Gu/KI

Projektleiter:


.....
(Dipl.-Ing. J. Zöllner)


.....
(Dipl.-Ing. Th. Guesnet)

DST – Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


.....
(Prof. Dr.-Ing. E. Müller)
Institutsdirektor

Literaturverzeichnis

- [1] M. O. Lammeren, „The Wageningen B-screw series,“ in *SNAME* 1969, 1969.
- [2] M. Oosterveld, *Wake adapted Ducted Propellers*, Wageningen, 1992.
- [3] T. Guesnet, „Untersuchung einer Serie von Düsen-Skew-Propellern mit hoher Flügelzahl (Meyne-VBD-Serie),“ DST, Duisburg, 1994.
- [4] F. Menter, „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications (MENTER),“ *AIAA Journal* 32(8), pp. 1598-1605, 1994.
- [5] ANSYS Inc., *Ansys CFX-Solver Theory Guide*, Southpoint 275 Technology Drive Canonsburg PA 15317, 2012.
- [6] T. Jiang, H. Lochte-Holtgreven und S. List, „Numerische und experimentelle Untersuchung zur Umströmung flachgehender, getunnelter Binnenschiffe unter Einbeziehung der Propellerwirkung,“ DST, Duisburg, 2003.
- [7] S. B. Müller, „Numerische Untersuchung der Maßstabseffekte an Schiffspropellern,“ Universität Duisburg-Essen, 2010.
- [8] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, Butterworth-Heinemann, 2nd Ed. 2007.
- [9] K. Hoffmann, „Anwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung,“ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2004.

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

A_E	[m ²]	Abgewinkelte und gestreckte Flügelfläche des Propellers
A_0	[m ²]	Propellerkreisfläche
B_m	[m]	Breite auf Spanten
c	[m]	Profillänge eines Propellerflügels auf 0,7 R
C_A	[-]	Zusatzwiderstandsbeiwert
C_B	[-]	Blockkoeffizient, Def.: $C_B = \Psi / (L_{WL} \cdot B_m \cdot T)$
C_1, C_2	[-]	Koeffizienten zur linearen Approximation von K_T über J
D	[m]	Propellerdurchmesser
F_D	[kN]	Reibungsabzug
F_{nh}	[-]	Froude' sche Tiefenzahl, Def.: $\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$
h	[m]	Wassertiefe
J	[-]	Fortschrittsziffer
K_Q	[-]	Drehmomentenbeiwert
K_T	[-]	Schubbeiwert
L_{PP}	[m]	Länge zwischen den Loten
L_{WL}	[m]	Wasserlinienlänge
n	[1/min], [1/s]	Propellerdrehzahl
P	[m]	Propellersteigung
P_D	[kW]	Wellenleistung am Propeller, Def.: $2 \pi Q n$
Q	[kNm]	Propellerdrehmoment
R_T	[kN]	Widerstand
S	[m ²]	Benetzte Oberfläche
T	[m]	Tiefgang
T_D	[kN]	Düsenschub
T_{gesamt}	[kN]	Gesamtschub $T_{gesamt} = T_P + T_D$
T_P	[kN]	Propellerschub
t	[-]	Sogziffer
V	[km/h]	Schiffsgeschwindigkeit
V_A	[m s ⁻¹]	Anströmgeschwindigkeit
Ψ	[m ³]	Verdrängungsvolumen
w_T	[-]	Nachstromziffer aus Schubidentität
Z	[-]	Flügelzahl
z_V	[cm]	Schiffsabsenkung
η_0	[-]	Propellerfreifahrtwirkungsgrad
η_B	[-]	Wirkungsgrad des Propellers hinter dem Schiff
η_D	[-]	Propulsionsgütegrad
λ	[-]	Modellmaßstabsziffer
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Wassers, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ für Süßwasser