

DigitShip

Erfassung, Analyse und Verwertung von Betriebsdaten
für effiziente und sichere Schiffe

Bewertung der Propulsionseffizienz anhand von Betriebsdaten(DigitProp)

Abschlussbericht

Lutz Kleinsorge, Benjamin Klemstein



MMG-AB-2024-04

10. Dezember 2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03SX514A

Copyright © 2024

Alle Rechte vorbehalten, Text, Bilder und Grafiken sind geschütztes Material.

Mecklenburger Metallguss GmbH

Teterower Str. 1

D-17192 Waren (Müritz)

Tel: + 49 3991 736 0

FAX: + 49 3991 736 210

email: kleinsorge@mmg-propeller.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Datengrundlage / Eingangsparameter	4
2.1	Auswahl des Referenzschiffes	4
2.2	Erfassung der Betriebsdaten	5
2.3	Referenzdaten	6
3	Entwicklung und Implementierung von Filter- und Validierungsmethoden für die Auswertung von Schiffsbetriebsdaten	10
3.1	Entwicklung der Filter- und Validierungsmethoden	10
3.2	Implementierung der Filter- und Validierungsmethoden	11
4	Analyse von Betriebsdaten und Empfehlungen für den Betrieb	19
5	Ermittlung Lastkollektive	27
6	Identifikation von Operationsprofilen und Einsparpotentialen	31
7	Veröffentlichungen	35
8	Zusammenfassung	36
	Literaturverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

2.1	Datenquellen und ihre Zusammenführung in Datenbanken im Vorhaben <i>DigitShip</i>	6
2.2	Visualisierung von erfassten Betriebsdaten auf einer Schiffsreise	7
2.3	CAD-Modelle für die CFD Propulsionsprognose	7
2.4	Freifahrtscharakteristik des Propellers	8
2.5	Ermittlung der Widerstandskurven für verschiedene Tiefgänge	8
2.6	Propulsionsprognosen für das Schiff	9
3.1	Ablaufplan nach ISO 19030 [1]	10
3.2	User Interface zum Importieren und Downsampling von Datensätzen	12
3.3	User Interface zur Datenvorverarbeitung	13
3.4	Filterkriterien nach <i>ISO 19030</i> mit Abschätzung verbleibender Daten [1]	14
3.5	UI Tabs zur Betriebsdatenfilterung	16
3.6	User Interface zur Visualisierung von Häufigkeiten	17
3.7	User Interface zur Visualisierung von Zeitreihen	17
3.8	User Interface zur Visualisierung von Routendaten	18
4.1	Häufigkeitsdiagramm der relativen Windgeschwindigkeit	20
4.2	Geschwindigkeit, Drehzahl und Leistungs-Diagramme	22
4.3	Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte	23
4.4	Die mittleren relativen Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte	24
4.5	Die relative Häufigkeitsverteilung der mittleren Tiefgänge	25
4.6	Geschwindigkeits- und Leistungsindikatoren in Abh. vom Tiefgang	26
5.1	Operationsprofil des Containerschiffes	27
5.2	Gemittelte Leistungsaufnahme und Drehzahl aus dem Betriebsprofil	28
5.3	Ablauf zur Ermittlung der Flügellast mit Hilfe eines Wirbelgitterverfahrens	29
5.4	Schub des Propellerflügels für die Festigkeitsauslegung	29
6.1	Operationsprofile für 4 250TEU Schiffe	32
6.2	4 250TEU Schiff 1: Operationsprofil	33
6.3	4 250TEU Schiff 1: Prognose der relativen Maschinenleistung	33
6.4	4 250TEU Schiff 1: Operationsprofil im Jahr 2019	34
6.5	4 250TEU Schiff 1: Mögliche Brennstoffeinsparungen im Jahr 2019	34

Tabellenverzeichnis

2.1	Hauptparameter von Schiff und Propeller	4
2.2	Hauptdaten des Propellers	5
4.1	Relative Datenverluste bei der Datenvorverarbeitung bezogen auf den Rohdatensatz	19
4.2	Kumulative verbleibende Datenpunkte bezogen auf die bereinigten Rohdaten . .	20
4.3	Kumulative verbleibende Datenpunkte nach Durchlaufen der Filterkriterien nach <i>ISO19030</i> bezogen auf die bereinigten Rohdaten	21

Danksagung

Wir danken dem *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*, das mit finanzieller Unterstützung einen wichtigen Beitrag zur Realisierung dieses Verbundvorhabens geleistet hat. Weiterhin möchten wir ebenfalls den Mitarbeitern des *Projektträgers Jülich* für die konstruktive Zusammenarbeit und Unterstützung dieses Vorhabens danken.

1 Einleitung

Die Digitalisierung der Systeme an Bord von Schiffen schreitet schnell voran. Die Aufnahme von Messdaten verschiedener Schiffssysteme erfolgt hierbei häufig schon automatisiert. Dies wird u.a. durch die Einführung von SEEMP, MRV oder der ISO-19030 zur Überwachung der Performance des Schiffsbetriebes getrieben. Der klassische „Noon-to-Noon“- Bericht der Schiffsführung wird hierdurch mittel- bis langfristig abgelöst. Den Schiffsbetreibern steht damit aufgrund der Automatisierung eine umfangreiche Datenbasis mit ggf. hoher zeitlicher Dichte zur Evaluation des Schiffsbetriebes zur Verfügung. Eine fundierte Auswertung der Daten bietet ein erhebliches Potenzial für einen effizienteren, sicheren und umweltfreundlicheren Betrieb. Zulieferern der Schiffbauindustrie ergibt sich hierdurch die Chance, mehr Informationen über den Betrieb ihres Systems zu erlangen. Dies führt zu neuen Möglichkeiten der Betriebsüberwachung der Anlagen, zum Beispiel bei der Festlegung von Wartungsintervallen, für Hinweise auf sachgemäße Anwendung der Anlagen, oder bei der Beratung im Schadensfall. Die aufgenommenen Daten können ebenfalls zur Produktverbesserung oder im Entwurf von neuen Schiffen und Bord-Systemen eine wichtige Rolle spielen.

Das Schiff sieht sich im realen Betrieb vielen stochastischen Randbedingungen ausgesetzt (z.B. Seegang, Wind, Strömung), die eine konsistente Analyse der gewonnenen Betriebsdaten erschweren. Zudem besitzen die zur Verfügung stehenden Messsysteme an Bord immer eine Messunsicherheit. Dies führt häufig zu inkongruenten Daten bei Messgrößen, zwischen denen ein physikalischer Zusammenhang besteht. Als einfaches Beispiel hierfür ist der Vergleich von Fahrt durchs Wasser und der Fahrt über Grund zu sehen, oder der Zusammenhang zwischen Drehzahl der Propellerwelle und der Leistung. Die Auswertung sich teilweise widersprechender Datensätze führt zu falschen Schlussfolgerungen für den Schiffsbetrieb (Effizienz) oder für die Entwicklung neuer Systeme. Andererseits ermöglichen die Vielzahl an unterschiedlichen Messsystemen erstmalig eine teilweise redundante Messmethodik, so dass „unnormale“ Zustände identifiziert werden können. Zudem können über physikalische Zusammenhänge und die einhergehende Berücksichtigung von rational ermittelten Randbedingungen (reale Operationsprofile, nautische und Wetterdaten, etc.) Daten gefiltert werden. Mit diesen validen Daten ist es dann möglich, die Performance und den Betrieb des Schiffes und dessen Systeme mittels ingenieurwissenschaftlicher Methoden deutlich genauer zu bewerten.

Damit ergeben sich für das Teilvorhaben der *MMG* folgende Zielstellungen:

- Erfassung von Langzeit Betriebsdaten eines Containerschiffes mit dokumentiertem Messaufbau und Einschätzung der Messunsicherheit und Messfehler aller Messgrößen.
- Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Filterung, Klassierung und Zusammenfassung großer Datenmengen
- Methoden und Verfahren zur Analyse und Bewertung der Betriebsdaten hinsichtlich Propulsionsperformance

- Entwurf eines Propellers und dessen Bewertung aufbauend auf extrahierten zukünftigen Betriebsprofilen

2 Datengrundlage / Eingangsparameter

2.1 Auswahl des Referenzschiffes

Im Rahmes des Vorhabens sind Betriebsdaten für ein Containerschiff über den Vorhabenszeitraum aufzuzeichnen. Dafür ist zunächst mit dem assoziierten Partner *CPO* ein geeignetes Schiff aus deren Bestandsflotte ausgewählt worden. Hierbei wurden folgende Anforderungen beachtet:

- Sensordaten vieler Betriebsparameter verfügbar
- Propeller am Schiff ist von *MMG*
- Dokumentation des Schiffes
 - Sensoren
 - Propulsionsanlagen, Maschine, etc.
 - Zustand des Schiffes
 - Modellversuche und Probefahrten

Aufgrund der Datenlage ist ein 14 000 *TEU* Containerschiff ausgewählt worden. Auf diesem gibt es bereits eine automatisiertes Sensormonitoring mit geringer Aufnahmeffrequenz, welches 116 verschiedene Sensorwerte erfasst. Diese setzen sich aus Informationen zu

- Navigation,
- Wind,
- Hauptmaschine und Hilfsaggregate,
- und Tankfüllungen und statische Schwimmelage,

zusammen. Damit kann der Betriebspunkt der Propulsion für das Vorhaben gut überwacht werden. Die dynamische Schwimmelage wird nicht erfasst. Hierfür ist zusätzlich ein Initialmesssystem durch den Projektpartner *UDE* konzipiert worden. Die Tabellen 2.1 und 2.2 geben einen Überblick über die Hauptparameter des untersuchten Containerschiffes.

Tabelle 2.1: Hauptparameter von Schiff und Propeller

Parameter	Größe	Einheit
Länge zwischen den Loten (L_{PP})	349,50	<i>m</i>
Breite (B)	51,20	<i>m</i>
Design Tiefgang (T_D)	14,00	<i>m</i>
Verdrängung (∇_D)	173 984,00	m^3

Tabelle 2.2: Hauptdaten des Propellers

Parameter	Größe	Einheit
Durchmesser (D)	9,10	m
Flügelzahl (z)	5	-
Flächenverhältnis (A_E/A_0)	0,665	-
Skew (Θ)	32,7	$^\circ$
Steigungsverhältnis (P_m/D)	0,91	-

2.2 Erfassung der Betriebsdaten

Die Aufnahmefrequenz dynamisch variierender Daten soll für das Vorhaben möglichst hoch sein. Daher ist beschlossen worden, einen zusätzlichen Datenlogger auf das Schiff zu bringen. Die Spezifikation wurde mit einem Unterauftragnehmer ausgearbeitet, sodass alle Sensordaten mit einer maximalen Frequenz von 5 Hz aufgenommen werden können. Zusätzlich können die Daten des Initialmesssystems mit aufgenommen werden. Diese Daten werden auf einem On-Board Rechner über Ethernet zusammengeführt und in einer Datenbank gespeichert. Die Software und Hardware ist über einen Unterauftragnehmer konzipiert und installiert worden. Aufgrund des hohen Datenvolumens durch die hohe Aufnahmerate und Anzahl der Sensoren ist beschlossen worden die Daten auf Wechselfestplatten zu speichern und diese regelmäßig auszutauschen. So werden hohe und teure Datenübertragungen während der Reisen des Schiffes vermieden. Um zusätzlich die Datenmenge zu reduzieren, sind die Sensoren anhand ihrer Messgröße mit verschiedenen Abtastraten aufgezeichnet worden. Sich wenig ändernde Informationen, wie z.B. Tankfüllungen, werden nur alle 15 min aufgezeichnet, Daten mit höherer Änderung, aber keinem Bezug zum Betriebszustand werden mit 1 min Intervallen aufgezeichnet. Alle dynamischen Messwerte, z.B. Geschwindigkeit, Drehzahl, Leistung, werden mit der höchsten Abtastrate von 200 ms aufgezeichnet. Jeder im Schiff angebrachter Sensor hat seine eigene Datenrate. Es ist also nicht sichergestellt, dass wirklich von jedem Sensor die höchste Abtastfrequenz von 200 ms bereitgestellt wird. Hat der Sensor eine geringere, so werden für die Zwischenzeiten, keine Änderungen im Messwert aufgenommen. Die Daten des Initialmesssystems werden mit gesonderter Abtastrate von 200 Hz aufgezeichnet.

Die Spezifikation für die Installation ist mit allen Partnern erarbeitet worden. Die Installation des Inertialmesssystems und dem Datenlogger fand durch den Unterauftragnehmer und die UDE auf dem Schiff am 07. Februar 2021 statt. Aufgrund der Corona-Auflagen ist diese Installation mit minimalem Personaleinsatz durchgeführt worden.

Neben den On-Board Daten sind im Vorhaben weitere Datenquellen mit Schiffsinformationen erschlossen worden. Hierzu gehören

- Statusmeldungen des Schiffes, welche von der Reederei mit einfließen,
- AIS-Daten von einem externen Provider,
- Wetterdaten von einem externen Provider.

Die externen Daten werden von dem Projektpartner URO organisiert. Im Vorhaben ist unter der Koordination der MMG eine Zusammenführung der Daten konzipiert worden. Diese findet

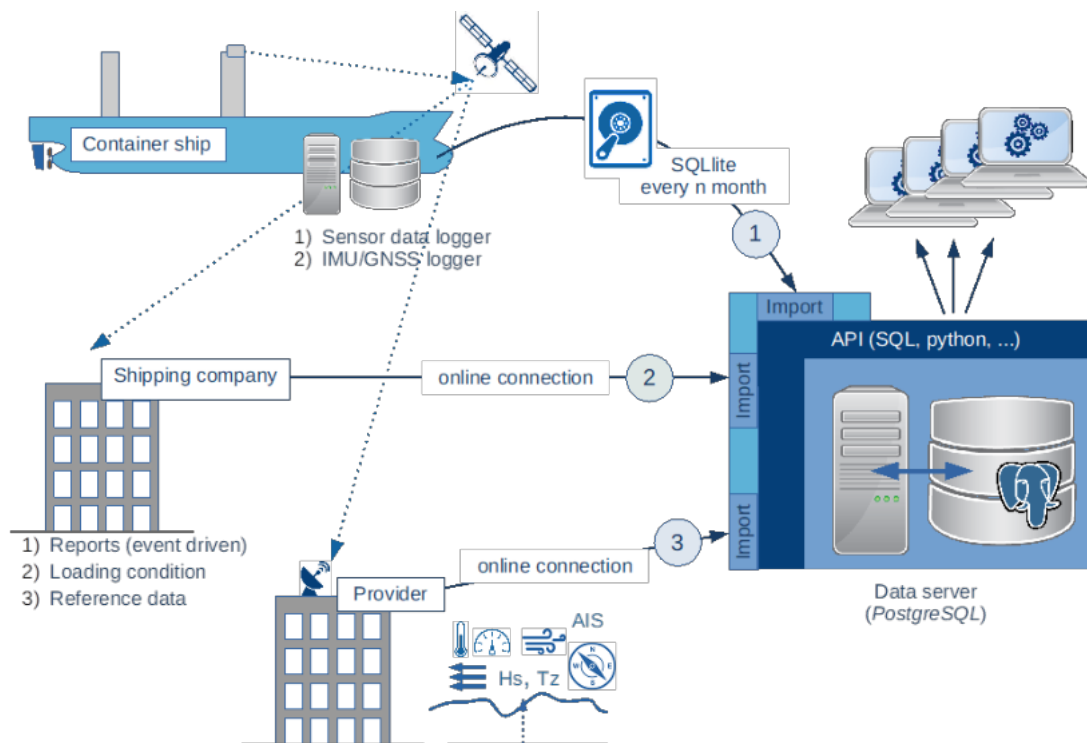


Abbildung 2.1: Datenquellen und ihre Zusammenführung in Datenbanken im Vorhaben *DigitShip*

in einer Datenbank statt, welche der Partner *URO* betreut und auf die alle Projektpartner via Remote-Access zugreifen können. Die Abbildung 2.1 stellt die einzelnen Datenquellen und ihre Zusammenführung in einer Datenbank schematisch dar.

Die Umsetzung der Datenbank und deren Zugriff erfolgt durch den Partner *URO*. Mit Hilfe der Programmiersprache *Python* ist es möglich beliebig erfasste Daten aus der Datenbank zu ziehen. Für die ersten verfügbare Schiffsreise (von Singapur nach Yangshan, Ningbo und Tanjung Pelepas, Reisedauer ungefähr 1 Monat), welche im Vorhaben erfasst wurde, ist in der Abbildung 2.2 das Bewegungsprofil des Schiffes dargestellt. Die Geschwindigkeit des Schiffes ist farblich gekennzeichnet. Zusätzlich sind die Intervalle der event-basierten Reports als grüne Kreise eingezeichnet. Es ist ersichtlich, wie genau die erfassten Daten sind im Gegensatz zu dem klassischen Noon-To-Noon Report.

2.3 Referenzdaten

Neben den erfassten Betriebsdaten an Bord müssen Referenzdaten für das untersuchte Schiff erarbeitet werden. Hierfür sind die Schiffsdaten zu digitalisieren. Für die Propulsion wichtige Einflussparameter sind zu generieren. Hierzu können zur Validierung Modellversuchs- und Probefahrtsberichte herangezogen werden. Um die Aussagen zu Off-Design-Bedingungen generieren zu können, sind CFD-Simulationen durchzuführen.

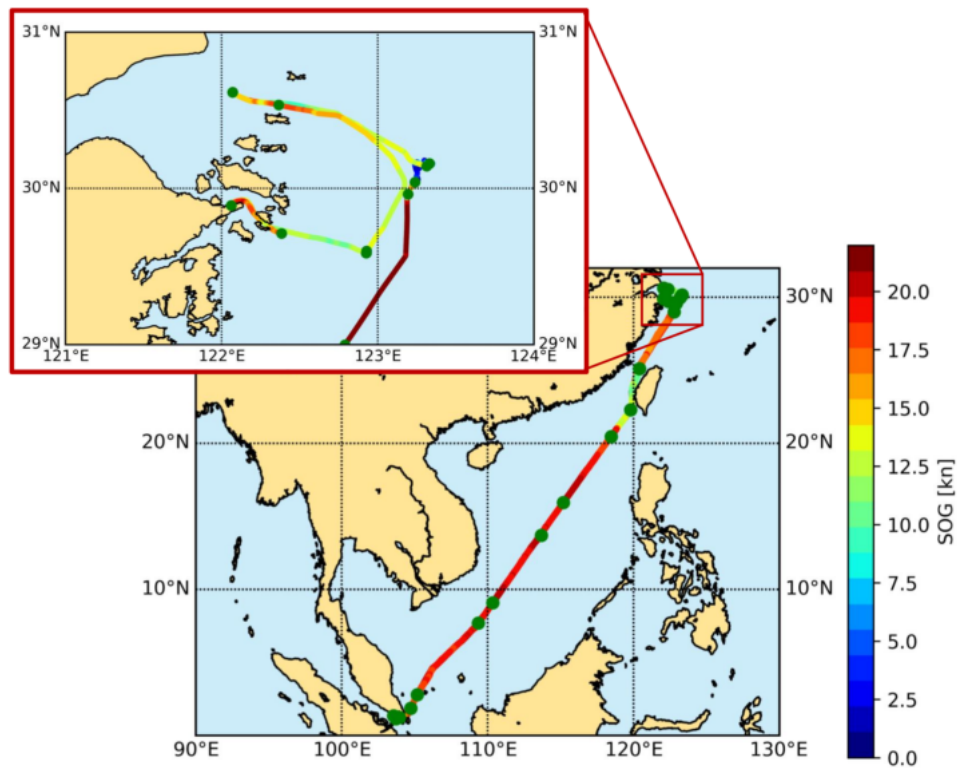


Abbildung 2.2: Visualisierung von erfassten Betriebsdaten auf einer Schiffsreise

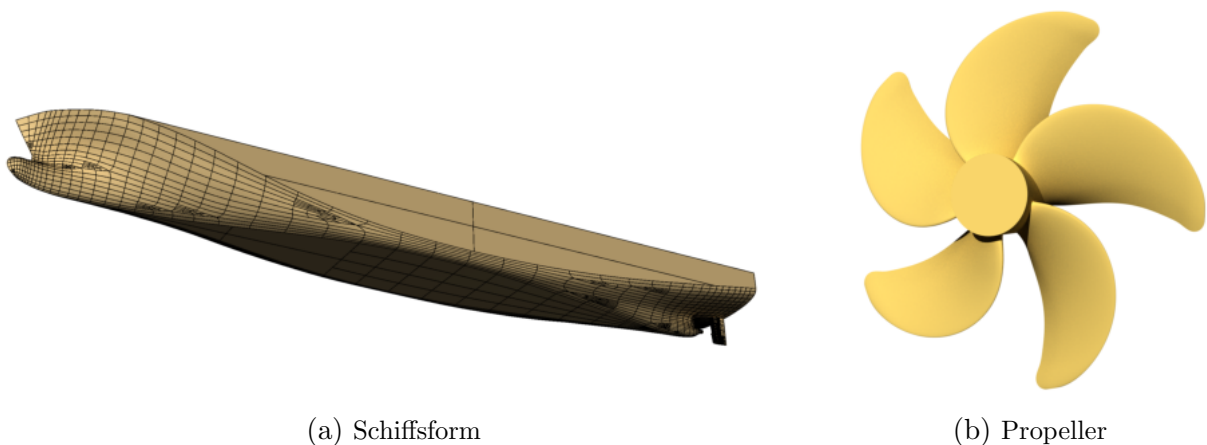


Abbildung 2.3: CAD-Modelle für die CFD Propulsionsprognose

Auf der Basis von Stahlplänen ist im Vorhaben die Schiffsform als CAD-Modell abgeleitet worden. Abbildung 2.3 zeigt die aufgebaute Schiffsform und den Propeller als fertige CAD-Modelle. Mit diesen sind Widerstands- und Propulsionssimulationen mit dem CFD-Löser *Cadence Fine-Marine* aufgebaut worden. Die Propellerfreifahrt ist mit dem Werkzeug *Ansys CFX* untersucht worden. Hier ist analog verfahren worden. Die Abbildung 2.4 zeigt die Freifahrtscharakteristik des Propellers. In der Abbildungen 2.5 ist ein Beispiel für die Widerstandssimulation, sowie Widerstandskurven für verschiedene Tiefgänge abgebildet. Bei den kleineren Tiefgängen sind

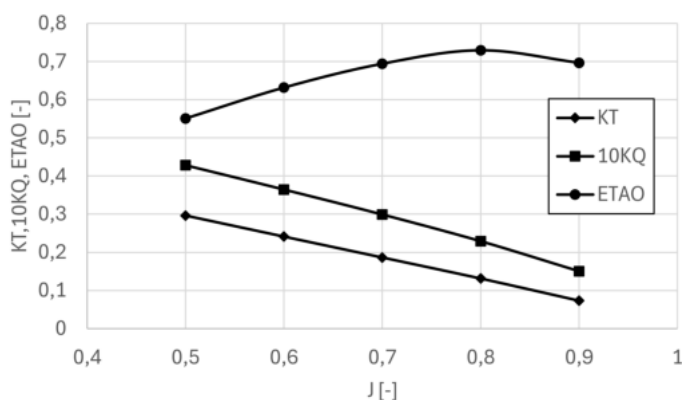
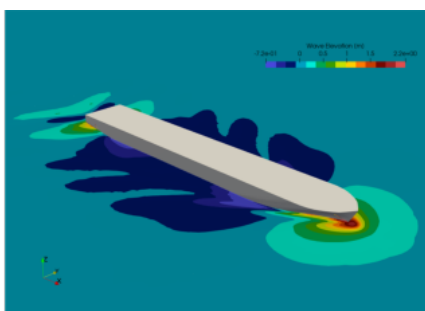


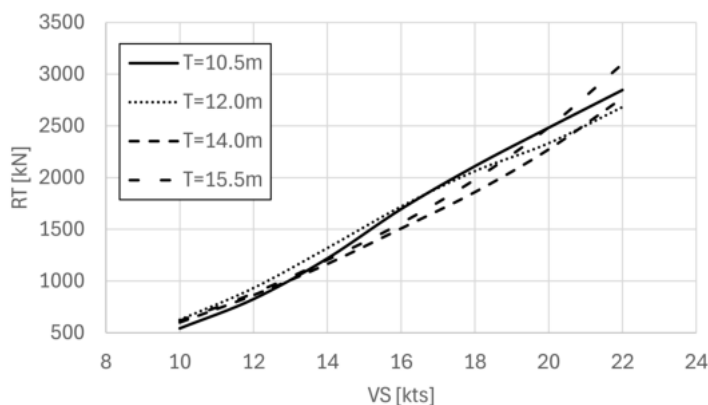
Abbildung 2.4: Freifahrtscharakteristik des Propellers

Bugwulst und Heck ausgetaucht, daher haben diese eine andere Charakteristik, als die ermittelten Widerstandskurven für $T = 14,00 m$ und $T = 15,50 m$.

Zur Prognose der Propulsion werden zusätzlich die Wechselwirkungsparameter zwischen Schiff und Propeller benötigt. Diese lassen sich mit Hilfe von Simulationen des Schiffes mit rotierendem Propeller ermitteln. Dies für alle Tiefgänge und Geschwindigkeiten durchzuführen ist mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden. Es sind daher die Werte nur für einen Tiefgang bei den Schiffsgeschwindigkeiten untersucht worden und diese auf die restlichen Tiefgänge übertragen worden. Die sich daraus ergebenden Propulsionskurven für verschiedene Tiefgänge sind in der Abbildung 2.6 zu sehen. Hier sind auch Propulsionskurven für weitere Tiefgänge (in grau) hinterlegt. Für diese Prognosen ist der Widerstand auf Basis der bestehenden Widerstandsprognosen interpoliert worden.



(a) Widerstandssimulation mit CFD



(b) Widerstandskurve

Abbildung 2.5: Ermittlung der Widerstandskurven für verschiedene Tiefgänge

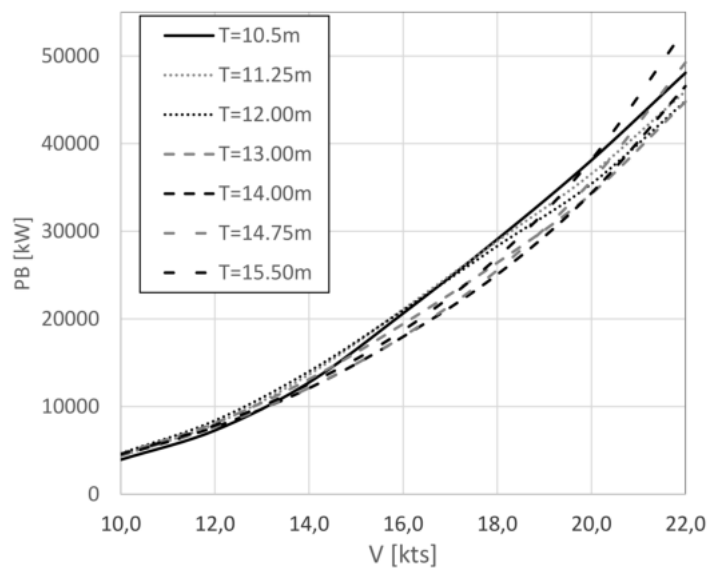


Abbildung 2.6: Propulsionsprognosen für das Schiff

5.4.3) erfolgt über einen Remote-Zugriff auf eine *SQL* Datenbank der Universität Rostock. Von dieser Datenbank werden sämtliche Datensätze, unabhängig von ihren Betriebszuständen (z.B. In Port, Maneuvering, At Sea) heruntergeladen. Die Datensätze sind dabei in Pakete für die gleiche Betriebspunkt ID zusammengefasst.

Vor der Filterung und Validierung (Punkt 5.4.5) erfolgen zuerst alle Schritte der grundlegenden Datenvorverarbeitung. Dies umfasst die Prüfung der Datentypen der einzelnen Spalten, der Behandlung und Bewertung fehlender Werte und ggf. das manuelle entfernen ganzer Spalten oder das Setzen bestimmter Werte für einzelne Tabellenspalten. Die Detektion von Ausreißern erfolgt über das *Chauvenet Kriterium*. Dieses Verfahren zur Ausreißerdetektion wird in der *ISO 19030* beschrieben und nimmt eine Normalverteilung der Messwerte innerhalb eines betrachteten Intervalls an. Die Empfehlung der *ISO 19030* ist die Zusammenfassung der Daten zu 10 Minuten Intervallen. Die Intervalle sollen sich dabei an ihren Intervallgrenzen nicht überschneiden. Nach der Ausreißerdetektion wird für jedes dieser Intervalle die Standardabweichung von Hauptmaschinendrehzahl, Geschwindigkeit über Wasser, Geschwindigkeit über Grund und Ruderwinkel berechnet. Ist die Standardabweichung größer als die Grenzwerte:

- $\Delta N = 3 \text{ rpm}$ für die Drehzahl der Hauptmaschine,
- $\Delta V_S = 0,5 \text{ kn}$ für die Geschwindigkeiten des Schiffes über Grund, bzw. durch das Wasser,
- und $\Delta \varphi = 1^\circ$ für den Ruderwinkel,

wird das gesamte Intervall als nicht valide betrachtet und aus dem Datensatz entfernt.

Nach der Validierung der Messdaten wird die Korrektur der gemessenen Drehleistung P_D aufgrund von Wettereinflüssen durchgeführt (Punkt 5.4.6). Derzeit wird in der *ISO 19030* die Drehleistung ausschließlich aufgrund des Windwiderstandes korrigiert. Für diese Korrektur werden neben Widerstands und Propulsionsdaten aus Referenzquellen auch Windwiderstandskoeffizienten für das Schiff benötigt. Alternativ können Windwiderstandskoeffizienten nach *ISO 15016* abgeschätzt werden. Für die Berechnung der Leistungsparameter (Punkt 5.4.7) wird die korrigierte Drehleistung auf eine Hauptmaschinenleistung umgerechnet und mit Hilfe einer Referenzleistungs-Geschwindigkeitskurve die Sollgeschwindigkeit unter Glattwasserbedingungen ermittelt. Auf diese Weise wird dann der relative Geschwindigkeitsbeiwert für jeden Datenpunkt ermittelt.

Abschließend werden die Daten anhand von bestimmten, in der *ISO 19030* festgelegten, Kriterien gefiltert (Punkt 6.3 und 6.3.2) und in Referenz- und Auswertungsintervalle eingeteilt. Für die jeweiligen Intervalle wird dann der mittlere relative Geschwindigkeitsbeiwert berechnet. Neben der Änderung des relativen Geschwindigkeitsbeiwerts zwischen Referenzintervall und Auswertungsintervall wird analog ein relativer Leistungsbeiwert berechnet.

3.2 Implementierung der Filter- und Validierungsmethoden

Die Implementierung der entwickelten Filter- und Validierungsmethoden erfolgt in die interne Entwurfsumgebung und wird in der Programmiersprache *Python* umgesetzt. Damit kann sichergestellt werden, dass alle Schiffs- und Propellerinformationen für die Durchführung und Analyse der Daten zur Verfügung stehen.

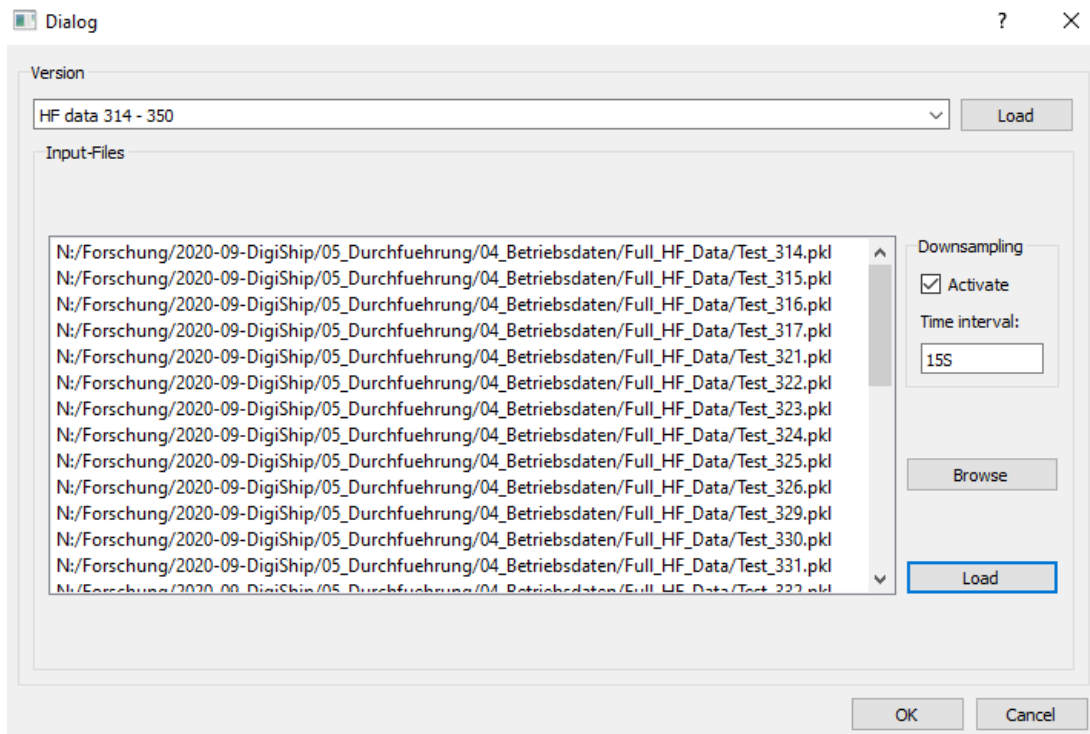


Abbildung 3.2: User Interface zum Importieren und Downsampling von Datensätzen

Die Rohdaten der Hochfrequenzmessungen liegen in ein Sekunden Schritten vor. Dadurch sind die Datensätze beim Importieren sehr groß. Für einen Tag (24h) besitzt eine einzelne Messgröße bereits 86.400 Einträge. Bei den für die Propulsion relevanten Messgrößen entstehen so rund 1,9 Millionen Einträge pro Tag, die verarbeitet werden müssen. Aus diesem Grund wird die Methode zum Importieren der Daten so entwickelt, dass Daten blockweise importiert und verarbeitet werden können. Weiterhin besteht die Möglichkeit die Anzahl der Rohdaten beim Import zu reduzieren, indem nur jeder n-te Datensatz importiert wird. Abbildung 3.2 zeigt die fertige Benutzeroberfläche unter Anwendung der Option des Downsamplings zu Daten mit jeweils 15 Sekunden zu einem Messpunkt.

Nach dem importieren der Daten kann mit der Vorverarbeitung begonnen werden. Die Schritte der Datenvorverarbeitung sind nicht vollständig in einer Methode automatisiert, da nicht gewährleistet ist, dass die nötige Vorverarbeitung für alle Datensätze immer identisch ist. Vielmehr sind einzelne Methoden entwickelt worden, die in beliebiger Reihenfolge auf die Daten angewandt werden können. Um die Datenvorverarbeitung der Schiffsbetriebsdaten konsistent durchführen und zwischenzeitlich kontrollieren zu können, ist neben den Methoden selbst, ein kompaktes Nutzerinterface (UI) entwickelt worden. Dieses UI ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Der Benutzer kann einen Datensatz zunächst in die Vorverarbeitung laden und sich grundlegende Metriken des Datensatzes berechnen lassen. Dazu zählen die generellen Informationen über die vorhandenen Tabellenspalten wie die Anzahl der Einträge und den Datentyp (Button *General Information* in Abb. 3.3). Über den Button *Statistics* kann sich der Nutzer Statistiken des Datensatzes berechnen und anzeigen lassen. Hier werden Minimal-, Maximal-, Mittelwert, Standardabweichung sowie die 25, 50 und 75% Quartile für jede Spalte berechnet. Eine Statistik zu fehlenden Werten in den Datensätzen wird über den Button *Missing Values* ermittelt. Das

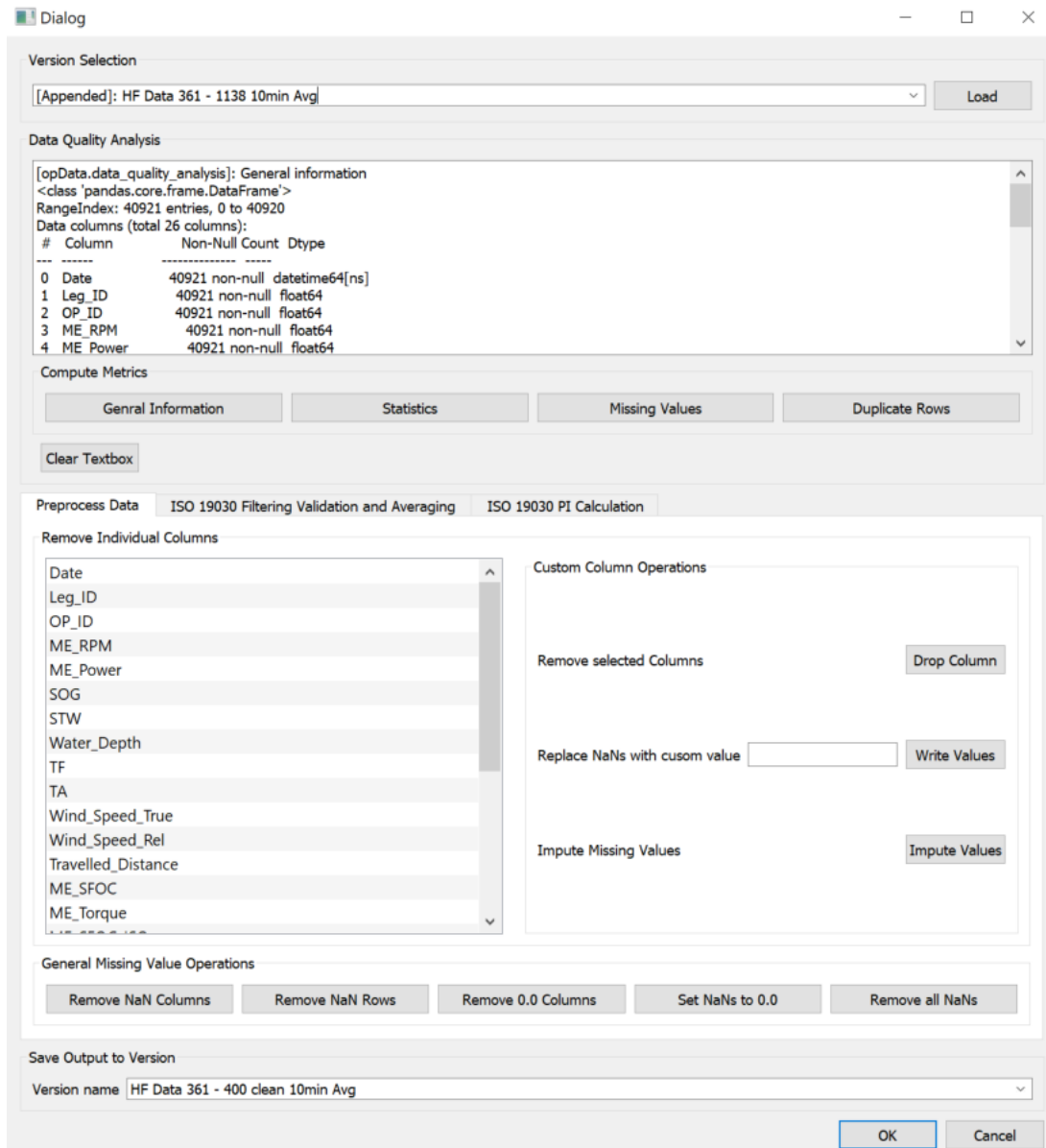


Abbildung 3.3: User Interface zur Datenvorverarbeitung

Auffinden und entfernen der Zeilen mit fehlenden Werten ist eine der wichtigsten Aufgaben in der Datenvorverarbeitung. Abschließend kann noch nach duplizierten Zeilen gesucht werden. Mit den Informationen aus den grundlegenden Metriken kann der Nutzer nun entscheiden, welche Schritte nötig sind, um den Datensatz zu bereinigen. Dazu zählt zum einen das Entfernen ganzer Spalten, die u.U. nicht in der Auswertung betrachtet werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, fehlende Werte mit vom Nutzer vorgegebenen Werten zu füllen. Dies ist z.B. besonders wichtig, wenn es um die Ermittlung der Wassertiefe geht. Da besonders die Bereiche mit hoher Wassertiefe für die Auswertung von Bedeutung sind, die Messgeräte hier aber keinen Wert zurückgeben, würden diese Daten bei späteren Arbeitsschritten entfallen. Hier macht es durchaus Sinn, einen Wert einzutragen, um die betreffenden Einträge zu erhalten.

	Number of observations	Cumulative remaining proportion of at-sea data (%)
All data (397 d, 1 sample/15 min)	38 112	
At sea data (and after exclusion of obvious outliers/missing data)	19 717	100
Wind speed < 7,9 m/s	12 881	65,3
Power > 0,3	8 643	43,8
Abs(SOG-STW) < 1 knot	7 344	37,3
Sea depth > criteria	5 636	28,6
Speed within limits	5 625	28,5

Abbildung 3.4: Filterkriterien nach *ISO 19030* mit Abschätzung verbleibender Daten [1]

Nachdem die einzelnen Operationen an dem Datensatz abgeschlossen sind, können alle übrigen Spalten, die vollständig aus fehlenden Werten oder ausschließlich nullen bestehen gelöscht werden oder es können alle fehlende Werte gleich null gesetzt werden. Letzteres Vorgehen ist aber in der Regel nicht zu empfehlen und nur für Ausnahmen sinnvoll. Die generelle Datenvorverarbeitung wird mit dem Entfernen aller Zeilen, in denen noch fehlende Werte vorkommen abgeschlossen. Die Effekte der einzelnen Operationen können vom Nutzer ständig kontrolliert werden, indem die genannten Metriken erneut berechnet und ausgegeben werden. Ebenso kann jeder Schritt zur Kontrolle einzeln gespeichert werden.

Sind die Daten soweit vorverarbeitet, dass keine fehlenden Werte mehr vorhanden sind, kann zur Filterung und Validierung nach *ISO 19030* übergegangen werden. Dabei wird, wie im Kapitel 3 beschrieben, zunächst vom Nutzer eine Zeitbasis festgelegt, auf der die Auswertung basieren soll. Danach werden Ausreißer und nicht valide Intervalle entfernt. Bei Bedarf kann der Datensatz hier auch anhand von individuellen Kriterien gefiltert werden. Das entwickelte UI-Element ist in Abbildung 3.5a zu sehen.

Die Auswertung nach *ISO 19030* wird mit der Berechnung der relativen Leistungsindikatoren, bezogen auf ein wählbares Referenzintervall, abgeschlossen. Das dazu entwickelte UI-Element ist Abb. 3.5b zu entnehmen. In der UI werden auf der linken Seite Referenzdaten aus numerischen Simulationen oder Versuchen angegeben. Auf der Rechten Seite von Abb. 3.5b wird die Leistung um den Windwiderstand korrigiert, dann wird damit der Geschwindigkeitsverlust berechnet und abschließend werden die Daten nach den in Abb. 3.4 gezeigten Kriterien nach *ISO 19030* gefiltert. Sind die zuvor beschriebenen Schritte ausgeführt, wird der relative Geschwindigkeitsbeiwert basierend auf einer Referenzperiode berechnet. Dazu kann der Nutzer eine Periodendauer wählen und alle übrigen, äquidistanten Intervalle, werden dann auf das Referenzintervall bezogen.

Neben den von der *ISO 19030* empfohlenen Methoden zur Bewertung der Rumpf- und Propellerleistung werden Methoden zur Visualisierung der Daten implementiert. Diese Methoden zur explorativen Datenanalyse geben dem Benutzer die Möglichkeit die Datensätze als Häufigkeitsdiagramme oder Zeitreihen darzustellen. Auch eine Vorgruppierung der Daten ist möglich, um das Verhalten sämtlicher Größen innerhalb einer Gruppe zu untersuchen. Es gibt ebenfalls die Möglichkeit gezielt bestimmte Zeiträume zu betrachten. Diese Daten werden dann farbig hervorgehoben. Außerdem werden die Leistungs-Geschwindigkeits- bzw. Leistungs-Drehzahldiagramme

für den Datensatz erstellt. Im Leistungs-Drehzahldiagramm werden neben den Datenpunkten die Motorkennlinie und die nominelle Propellerkurve angezeigt. Weiterhin hat man die Möglichkeit eine Messgröße über die Schiffposition darzustellen. Die Abbildungen 3.6, 3.7 und 3.8 zeigen die entsprechenden Elemente aufgrund ihrer Größe nur als der Übersicht.

(a) UI Tab zur Ausreißerdetektion, Validierung und Mittlung der Daten

(b) UI Tab zur Leistungsindikatorberechnung über ein gewählten Zeitraum (hier 3 Monate)

Abbildung 3.5: Detailaufnahme der UI Tabs zur Durchführung der Leistungskorrektur und der Leistungsindikatorberechnung

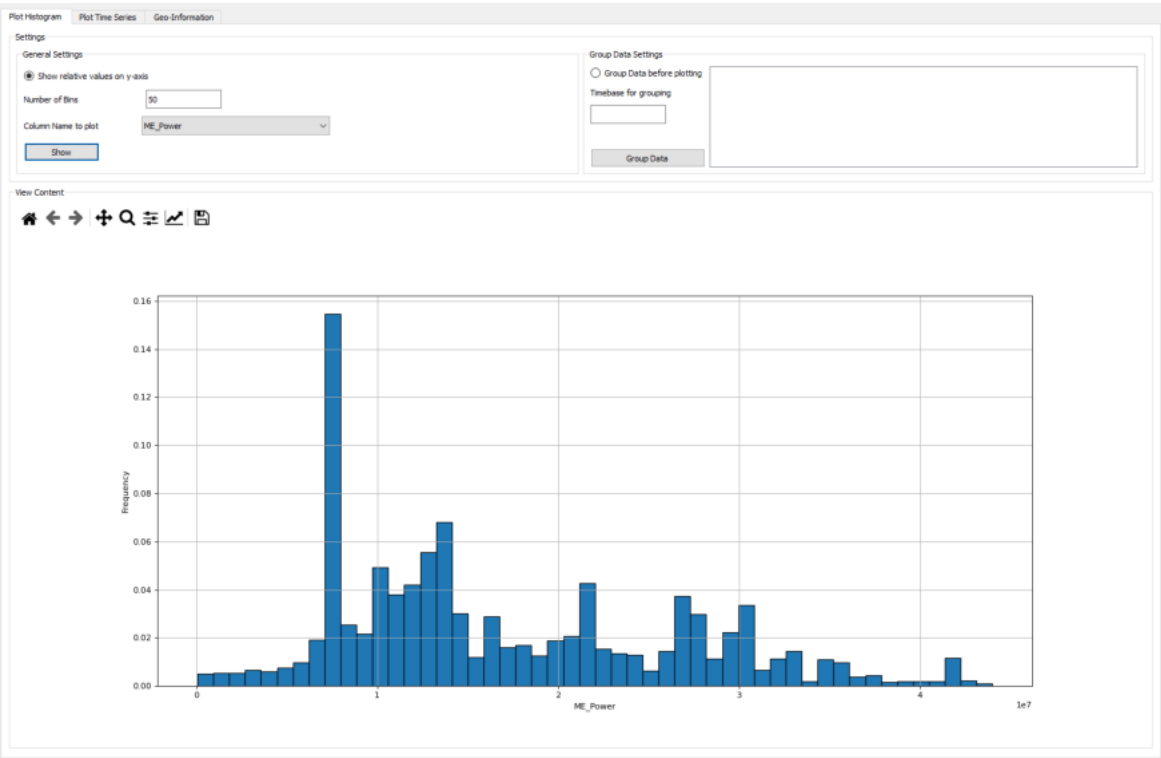


Abbildung 3.6: User Interface zur Visualisierung von Häufigkeiten

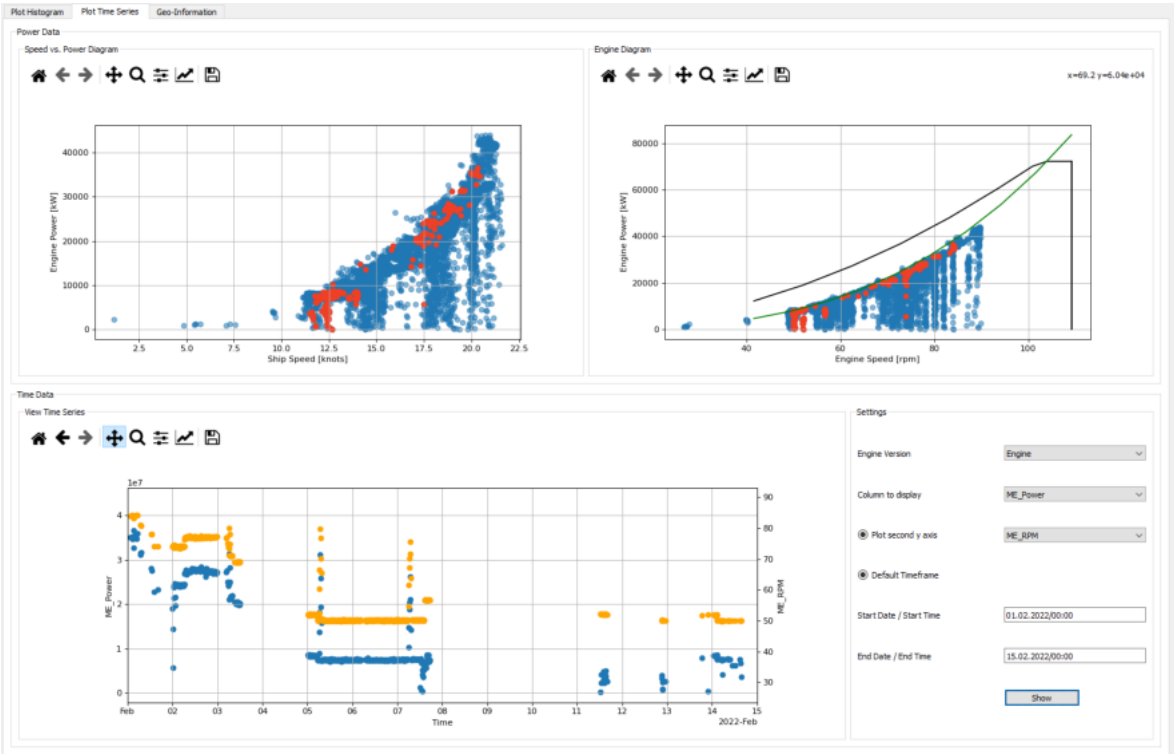


Abbildung 3.7: User Interface zur Visualisierung von Zeitreihen

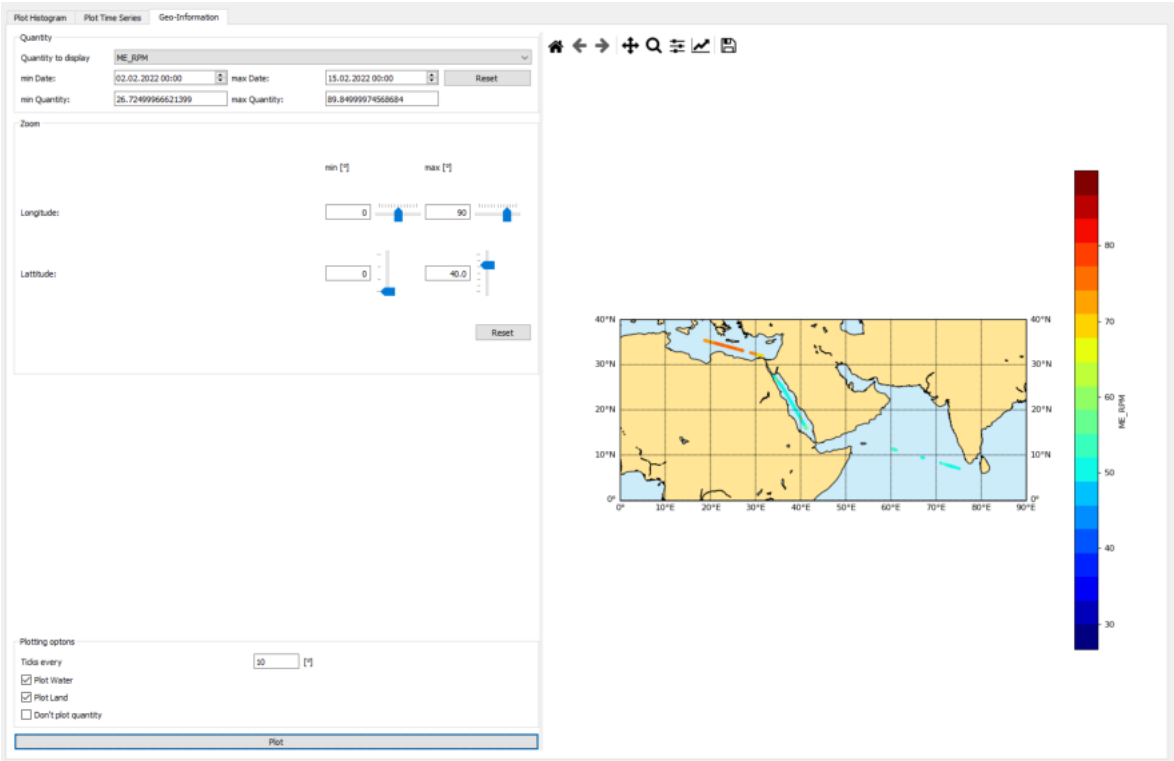


Abbildung 3.8: User Interface zur Visualisierung von Routendaten

4 Analyse von Betriebsdaten und Empfehlungen für den Betrieb

Für die Analyse der Betriebsdaten werden alle vorhandenen Datensätze geladen. Dabei wird ein 30 Sekunden Resampling angewandt, um größere Gruppen von Datensätzen auf einmal importieren zu können. Die so importierten Rohdaten werden wie in Kapitel 3 beschrieben Vorverarbeitet, von Ausreißern bereinigt und Validiert. Bei den einzelnen Bereinigungsstufen werden immer wieder Daten aussortiert. Um eine Übersicht über die dabei entstehenden Datenverluste zu haben, wird der relative Datenverlust der einzelnen Datenvorverarbeitungsstufen ermittelt und ausgewertet. Um die Datenverluste möglichst klein zu halten, werden alle nicht für die *ISO 19030* Bewertung benötigten Spalten entfernt. Dabei verbleiben von den ursprünglich 65 Spalten noch 23 im Datensatz. Das Ergebnis der relativen Datenverluste für einige ausgewählte Datensätze ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Die mittleren relativen Datenverluste über alle Datensätze werden dort ebenfalls gezeigt.

Wie anhand von Tabelle 4.1 zu sehen ist, werden im Mittel 39,6% der Daten bei der Datenvorverarbeitung entfernt. Dieser Datenverlust scheint zunächst sehr hoch. Man muss jedoch beachten, dass ein mitunter beachtlicher Teil der Datenverluste auf das Resampling zurückzuführen ist. Das Resampling funktioniert so, dass es ein äquidistantes Intervall erzeugt wird. Wenn in den Rohdaten aber einige Sekunden, Minuten oder Stunden fehlen, werden diese mit NaN Werten gefüllt. In Kombination mit vielen, sich nicht überschneidenden, fehlenden Werten in den Rohdaten, entstehen so sehr schnell große Datenverluste, da immer ganze Zeilen entfernt werden. Ein Extremfall hierfür ist der Datensatz 1088 – 1100. Hier entfallen 75,6% der Einträge durch die zuvor beschriebenen Effekte. Von diesen 75,6% an Datenverlusten stammen 45,1% aus aufgefüllten Intervallen. Der tatsächliche Datenverlust aufgrund von fehlenden Messwerten beträgt 30,5%.

Die Einzeldatensätze werden nach der Datenvorverarbeitung zu einem einzelnen Gesamtdatensatz zusammengefügt. Auf diesem Datensatz wird dann die Ausreißerdetektion, Validierung, Leistungskorrektur aufgrund von Wind, Berechnen der Leistungsindikatoren und die Filterung nach den Kriterien der *ISO 19030* für die Referenzbedingungen durchgeführt. Da hier besonders von Interesse ist, wie viele Datenpunkte für den jeweils nächsten Auswertungsschritt erhalten bleiben, wird nicht der Datenverlust, sondern die kumulativ verbleibenden Datenpunkte bewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung ist Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Tabelle 4.1: Relative Datenverluste bei der Datenvorverarbeitung bezogen auf den Rohdatensatz

Datensatz	506 – 560	721 – 800	962 – 1012	1088 – 1100	Mittl. rel. Datenverl.
Rohdaten	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Datenvorverarbeitung	36,4	27,8	46,6	75,6	39,6

Tabelle 4.2: Kumulative verbleibende Datenpunkte bezogen auf die bereinigten Rohdaten

	Anz. Datenpunkte	Kumulative verbl. Daten in %
Gesamtdatensatz (1 Sample/30 sek.)	993 032	
nach Ausreißerdetektion und Validierung	470 488	100
nach ISO Filterung	106 289	22,6

Im Falle der Betriebsdaten des Forschungsvorhabens bleiben von 470 488 Datenpunkten nach der Filterung noch 106 289 Datenpunkte übrig. Das entspricht rund 22,6% der validierten Daten. Die Ursache für diese starke Reduktion der Datenpunkte wird auch in der *ISO 19030-2* thematisiert. Demnach ist die Menge der zulässigen Betriebszustände stark abhängig von den tatsächlich vorherrschenden Wetterbedingungen im Schiffsbetrieb. Dadurch fallen zum Teil größere Datenmengen weg, die außerhalb der Filtertoleranzen liegen. Das ist beispielsweise bei Windgeschwindigkeiten über $v = 7,9 \text{ m/s}$, was 4 Beaufort entspricht, der Fall. Zur Prüfung dieses Umstandes in dem Datensatz des Forschungsvorhabens, wird das Histogramm der relativen Windgeschwindigkeit betrachtet. Abbildung 4.1 zeigt das Histogramm mit den relativen Häufigkeiten der gemessenen relativen Windgeschwindigkeiten und die nach *ISO 19030* festgelegte Filtergrenze von $v = 7,9 \text{ m/s}$.

Aus Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass ein Großteil der Daten allein aufgrund der Windgeschwindigkeiten entfallen muss, was einem Anteil von 43,4% entspricht. Alle übrigen Filterkriterien wie Wassertiefe, Betrag der Geschwindigkeitsdifferenzen, das Leistungsspektrum und die Tiefgangsbegrenzung machen zusammen die übrigen 34 % der Datenverluste aus. Die verfügbaren Referenzdaten besitzen ebenfalls signifikanten Einfluss auf die Menge der übrigen Datenpunkte. Entsprechend der Datenlage der Referenzdaten fallen hier mehr oder weniger Daten-

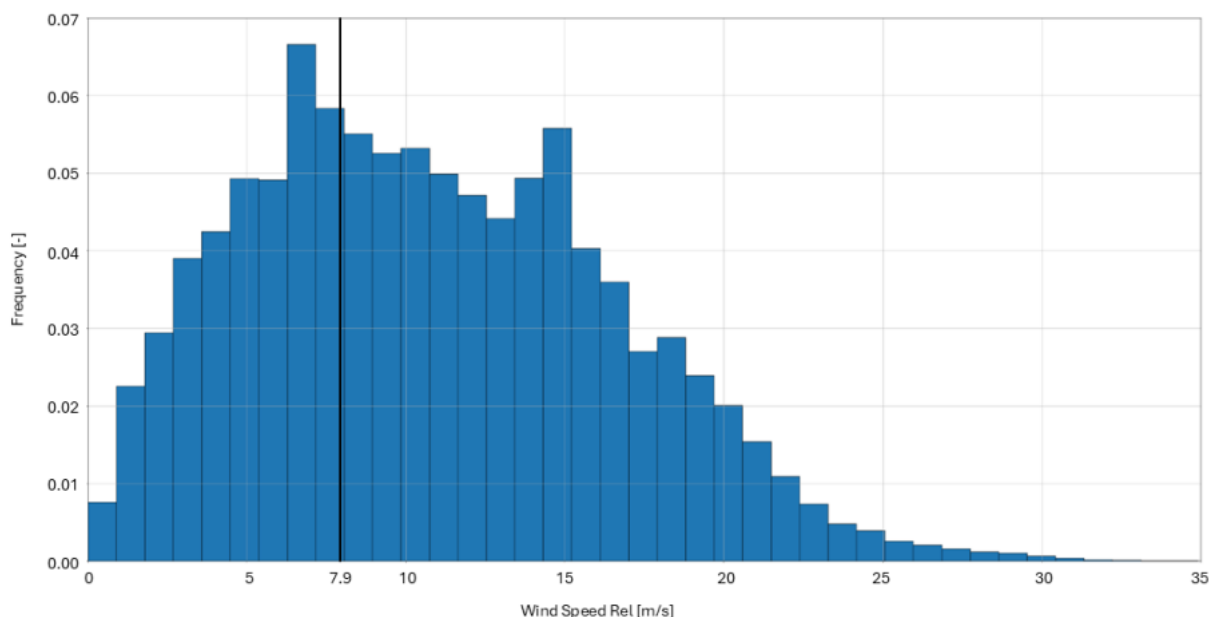


Abbildung 4.1: Häufigkeitsdiagramm der relativen Windgeschwindigkeit über alle Datenpunkte mit dem Grenzwert für das Filterkriterium für die Windgeschwindigkeit von $7,9 \text{ m/s}$

Tabelle 4.3: Kumulative verbleibende Datenpunkte nach Durchlaufen der Filterkriterien nach *ISO19030* bezogen auf die bereinigten Rohdaten

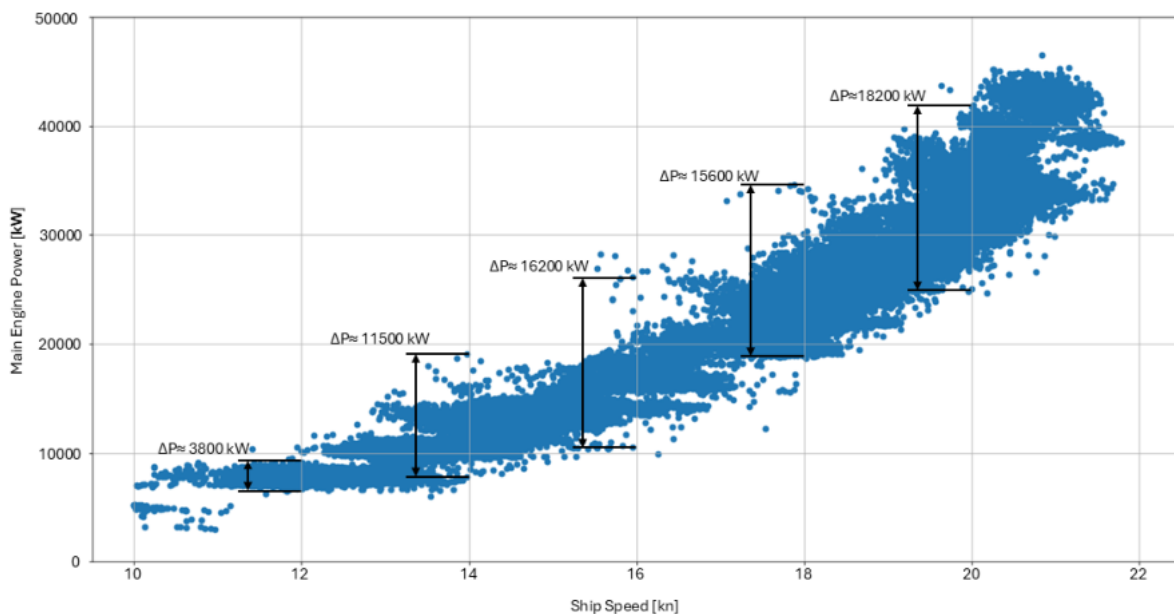
Filterkriterium	Anz. Datenpunkte	Kumulative verbl. Daten in %
Ausreißerdetektion und Validierung	470 488	100,0
Wassertiefenkriterium	343 592	73,0
Geschwindigkeitskriterium	313 610	66,7
Windgeschwindigkeitskriterium	109 644	23,3
Leistungskriterium	109 644	23,3
Tiefgangskriterium	106 289	22,6

punkte weg. Je nachdem welche Tiefgänge und oder Schiffsgeschwindigkeiten in den Leistungs-Geschwindigkeitskurven enthalten sind und wie groß die Filtertoleranzen gewählt werden. Tabelle 4.3 schlüsselt die einzelnen Filterschritte kumuliert auf und zeigt, dass der Großteil der Datenpunkte aufgrund von Umwelteinflüssen herausgefiltert wird. Die verbliebene Datenmenge wird daher als hinreichend angenommen.

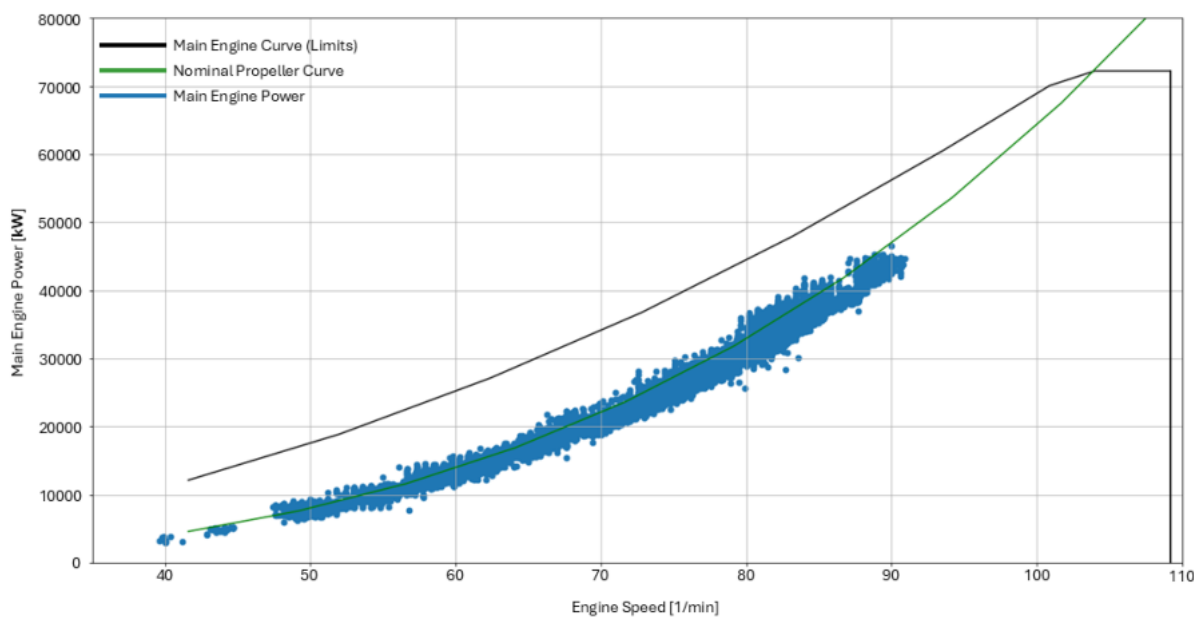
Vor den vertiefenden Auswertungen nach *ISO 19030* wird mit den verbliebenen Datenpunkten ein Geschwindigkeits-Leistungs- und ein Drehzahl-Leistungsdiagramm erstellt. Ziel ist es, zu visualisieren, wie die gefilterten Datenpunkte in beiden Diagrammen liegen und ob sich ein plausibler Zusammenhang ergibt. Das Geschwindigkeits-Leistungsdiagramm in Abbildung 4.2a zeigt deutliche Unterschiede im Leistungsbedarf bei konstanten Geschwindigkeiten. Diese reichen von 3,8 MW bei 12kn bis 18,2 MW bei 20 kn. Diese Schwankungen im Leistungsbedarf haben ihre Ursache in der Variation des Beladungszustandes, in nicht berücksichtigten Umweltfaktoren und in dem Zustand der Außenhaut.

Das Drehzahl-Leistungsdiagramm ist in Abbildung 4.2b aufgetragen. Hier streut die Punktwolke um die nominelle Propellerkurve. Die Lage links und rechts der nominellen Kurve beschreibt Schwankungen im Leichtlaufverhalten des Propellers. Es zeigt sich, dass der Großteil der Punkte rechts von der nominellen Kurve liegt und somit der Propeller bei konstanter Leistung größtenteils mit höherer Drehzahl läuft. Auch hier besitzen der Beladungszustand, die nicht berücksichtigten Umweltfaktoren und der Zustand des Rumpfes einen großen Einfluss auf die Lage eines Punktes. Steigt der Schiffswiderstand bei konstanter Hauptmaschinenleistung z.B. durch Fouling an, wandert der Punkt nach links, da die Propellerbelastung ebenfalls ansteigt und damit das von der Hauptmaschine aufzubringende Drehmoment. So sinkt bei konstanter Hauptmaschinenleistung die Drehzahl ab. Sinkt jedoch der Schiffswiderstand aufgrund von beispielsweise Reinigung des Schiffsrumpfs wandert der Punkt wiederum nach rechts, da die Propellerbelastung sinkt und damit die Drehzahl ansteigt. Die nach der Filterung verbliebenen Datenpunkte in Abbildung 4.2 zeigen ein plausibles Verhalten. In wie weit die Kombination aus Beladungs-, Rump fzustand und Umwelteinflüssen einen Einfluss auf die Hauptmaschinenleistung ausübt, soll im folgenden untersucht werden. Dafür wird die Auswertung nach *ISO 19030* herangezogen.

Aus den gefilterten Datenpunkten wird in Kombination mit Referenzdaten aus numerischen Simulationen die Referenzgeschwindigkeit bzw. die Referenzleistung ermittelt. Mit diesen Referenzwerten werden anschließend die relativen Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte nach *ISO 19030* für jeden Datenpunkt berechnet. Geschwindigkeitsbeiwerte werden mit *SPV* und Leistungsbeiwerte mit *PPV* bezeichnet. Beide Beiwerte sind in Prozent angegeben und beziehen sich auf die Abweichung zum Referenzwert. Die für die einzelnen Datenpunkte berechneten

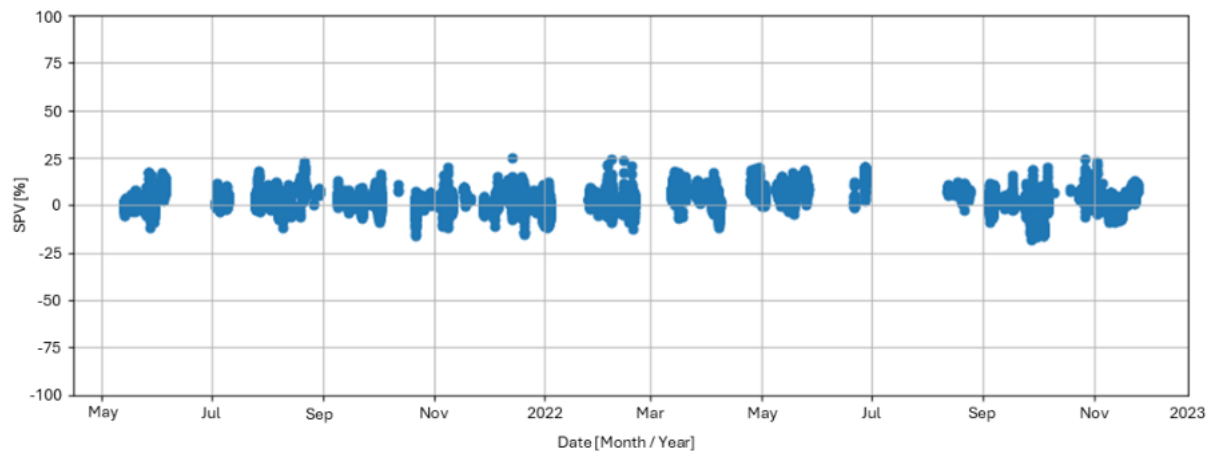


(a) Das Geschwindigkeits-Leistungsdiagramm mit den variierenden Leistungsanforderungen bei konstanten Schiffsgeschwindigkeiten

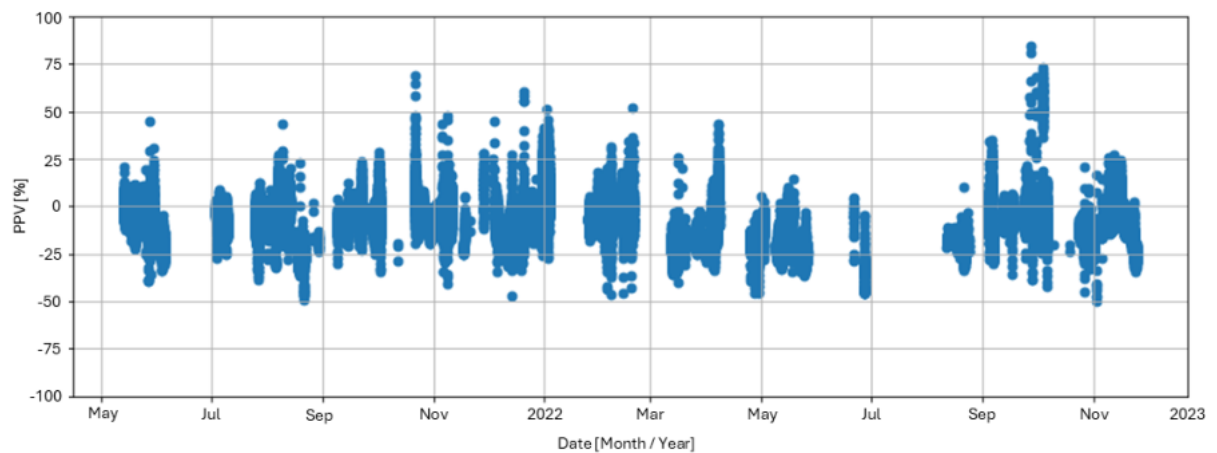


(b) Das Drehzahl-Leistungsdiagramm mit Hauptmaschinendiagramm und nomineller Propellerkurve

Abbildung 4.2: Zusammenhang aus Leistung und Schiffsgeschwindigkeit bzw. Leistung und Propellerdrehzahl der um den Windwiderstand korrigierten und anschließend nach ISO 19030 gefilterten Datenpunkte



(a) Die Geschwindigkeitsbeiwerte SPV



(b) Die Leistungsbeiwerte PPV

Abbildung 4.3: Die aus den Referenzdaten berechneten Werte für Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte SPV und PPV der validierten und gefilterten Datenpunkte über den gesamten Messzeitraum

Werte für SPV und PPV sind in Abbildung 4.3 gezeigt. Beim Vergleich der Diagramme in der genannten Abbildung wird erkennbar, dass die Geschwindigkeitsbeiwerte eine erheblich geringere Streuung besitzen als die Leistungsbeiwerte. Dieser Umstand ist auch beim Vergleich des Geschwindigkeits- Leistungs- und des Drehzahl-Leistungsdiagramms zu beobachten: Die Leistung streut hier ebenfalls in größerem Umfang als die Drehzahlen. Weiterhin ist zu beobachten, dass beide Beiwerte ihre Vorzeichen wechseln. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da das Schiff schneller bzw. langsamer fahren kann als die Referenzgeschwindigkeit bzw. die aufgenommene Leistung kann größer oder kleiner sein als die Referenzleistung. Ein negatives Vorzeichen bedeutet, dass ein Wert kleiner als der Referenzwert ist. Ein positives Vorzeichen wiederum bedeutet, dass ein Wert größer als der Referenzwert ist.

Aus den berechneten Beiwerten werden anschließend die mittleren relativen Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte berechnet. Dafür muss zunächst ein Referenzintervall gewählt werden. Dieses Referenzintervall ist nach *ISO 19030* grundsätzlich frei wählbar. Es ergibt jedoch Sinn das Referenzintervall so zu wählen, dass sich ein aussagekräftiger Vergleich ergibt. Das ist dann

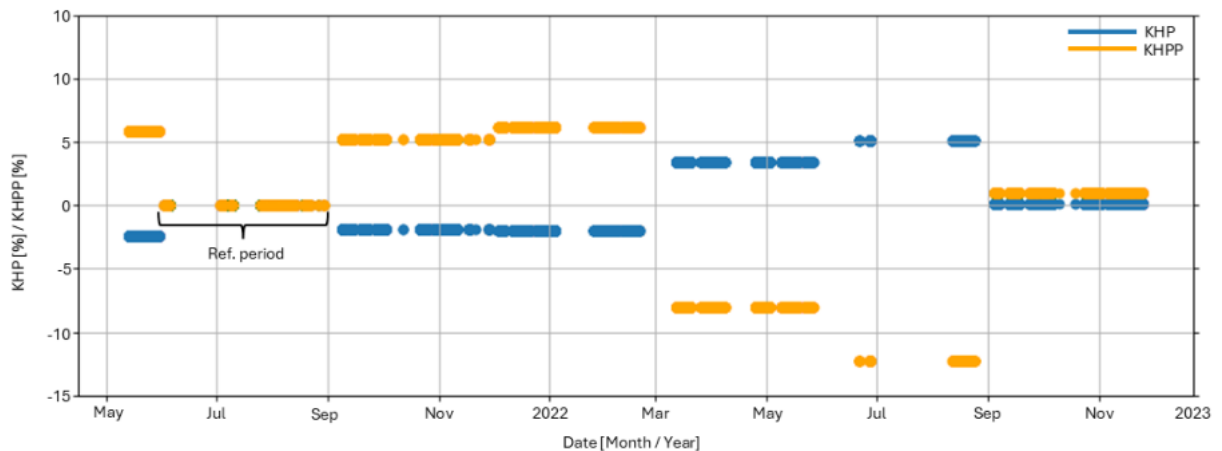


Abbildung 4.4: Die mittleren relativen Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte

gegeben, wenn das Schiff z.B. für die Aufarbeitung der Außenhaut im Dock war oder ein Propeller retrofit stattgefunden hat. Da während der gesamten Messperiode keine signifikanten Änderungen an Rumpf oder Propeller vorgenommen wurden, wird ein Referenzintervall von drei Monaten zu Beginn der Messungen gewählt. Die sich ergebenden Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte sollten so die nicht berücksichtigten Umwelteinflüsse sowie die Degradation des Rumpf- und Propellerzustandes zeigen. Das gewählte Referenzintervall liegt in dem Zeitraum vom 01.06.2021 bis zum 31.08.2021. Die auf dieses Referenzintervall bezogenen, berechneten, mittleren Geschwindigkeits- KHP und Leistungsbeiwerte KHPP sind ebenfalls jeweils für einen Zeitraum von drei Monaten berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.4 gezeigt.

In den Monaten Mai und Juni 2021 fährt das Schiff demnach etwa 2,5% langsamer und benötigt dabei 5,8% mehr Leistung. Von September 2021 bis März 2022 liegt der Geschwindigkeitsbeiwert relativ konstant bei rund -2%. Gleichzeitig ist die aufgenommene Leistung bis zu 6,5% größer als im Referenzintervall. Von März bis September 2022 fährt das Schiff bis zu 5% schneller, besitzt hier jedoch eine um 8 – 13% geringere Leistungsaufnahme als im Referenzintervall. Im letzten verfügbaren Intervall, September bis Ende November 2022, ist das Schiff rund 0,2% langsamer unterwegs. Dabei ist die aufgenommene Leistung um etwa 0,7% größer.

Aus den ermittelten zusammenhängen der Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte lässt sich mit den Messdaten aus zwei Jahren nicht eindeutig ein Trend ablesen. Aus diesem Grund werden die Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte für ausgewählte Tiefgangsbereiche betrachtet. Das Ziel dabei ist, durch die Berücksichtigung des Baladungszustandes eventuelle Trends sichtbar zu machen. Die relevanten Tiefgänge werden aus der relativen Häufigkeitsverteilung der mittleren Tiefgänge aus den Betriebsdaten ermittelt. Anhand von Abbildung 4.5 ist zu erkennen, dass Tiefgänge zwischen 13,5 und 14,0 m sowie zwischen 15,0 und 15,5m am häufigsten auftreten. Für diese Tiefgangsbereiche wird der Datensatz anhand des mittleren Tiefgangs gefiltert und dann die Berechnung der Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte durchgeführt. Für diese Auswertung wird jeweils das erste verfügbare Auswertungsintervall als Referenzintervall gewählt.

Das Ergebnis der Auswertung der Leistungs- und Geschwindigkeitsbeiwerte für ausgewählte Tiefgangsbereiche ist in Abbildung 4.6a gezeigt. Für Tiefgangsbereiche von 13,5 bis 14,0 m erkennt man einen durchgehenden Trend. Die Schiffsgeschwindigkeit fällt ab und die Hauptmaschinenleistung steigt über das Messintervall an. Für Tiefgänge von 15,0 bis 15,5m verhält es sich

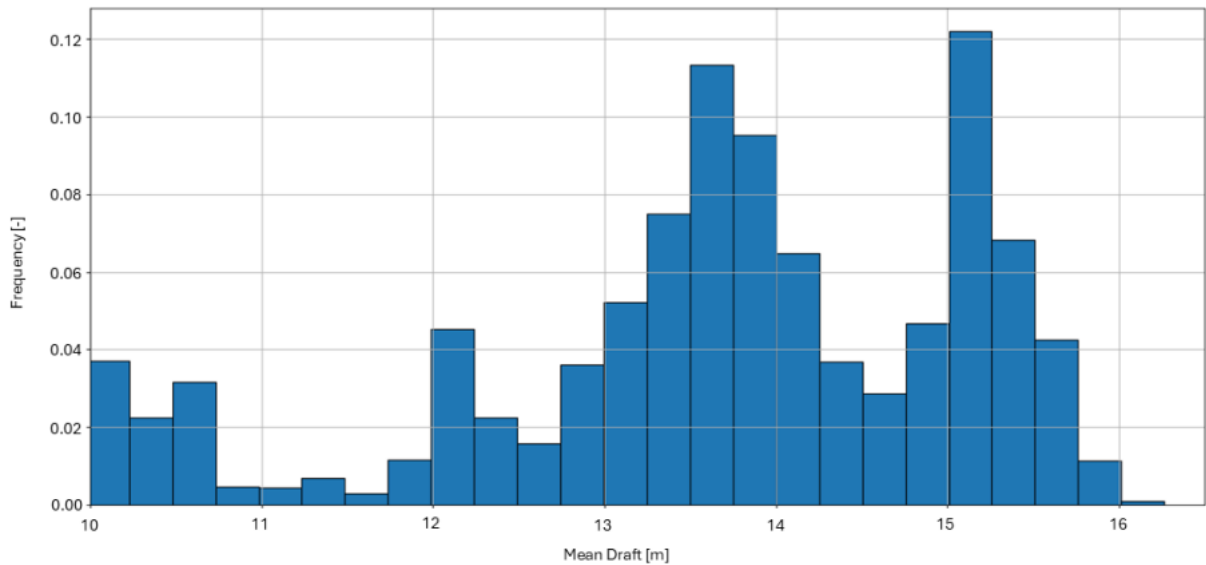
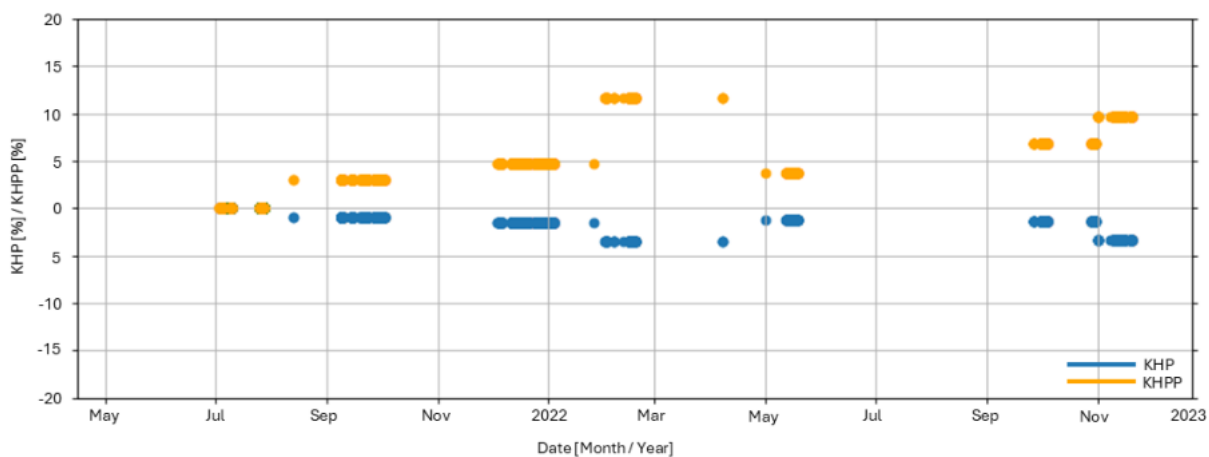


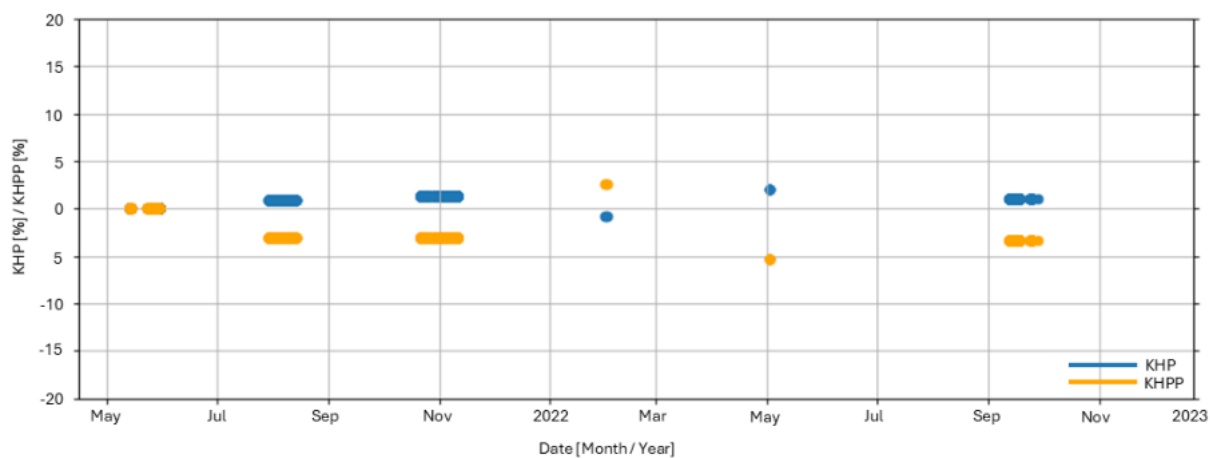
Abbildung 4.5: Die relative Häufigkeitsverteilung der mittleren Tiefgänge

umgekehrt wie Abbildung 4.6b zeigt. In diesem Tiefgangsbereich ist die Schiffsgeschwindigkeit meist größer und die aufgenommene Leistung kleiner als im Referenzintervall.

Aus der Betrachtung der Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte unter Berücksichtigung von allen Messwerten und Beladungszuständen sowie den weiter nach Tiefgangsbereichen gefilterten Datenpunkten wird deutlich, wie wichtig es ist, große Zeiträume zu betrachten. Es ist nicht bekannt, ob sich die Unterschiedlichen Betriebspunkte und Beladungszustände mit den jeweiligen Wetterbedingungen so oft in den Datenpunkten der einzelnen Intervalle wiederfinden, dass sich die nicht betrachteten Einflüsse beim bilden des Mittelwertes gegenseitig aufheben. Die derzeitige Datenlage vermittelt den Eindruck, dass dies bisher nicht der Fall ist. Da es unter den gegebenen Umständen schwer ist, konkrete Empfehlungen zum Schiffsbetrieb zu geben, bleibt als weitere Möglichkeit die Einbeziehung von Wellendaten in die Auswertung. Auf diese Weise könnte gezeigt werden, ob die größeren bzw. geringeren Leistungsaufnahmen aus einer für den Schiffsbetrieb nachteiligen bzw. vorteilhaften Wellenrichtung herrühren.



(a) Die Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte KHP und $KHPP$ für Tiefgänge zwischen 13,5 bis 14,0 m



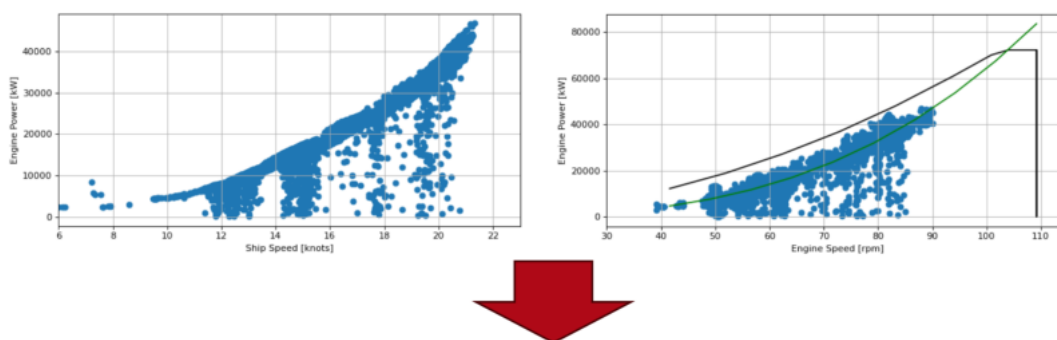
(b) Die Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte KHP und $KHPP$ für Tiefgänge zwischen 15,0 bis 15,5m

Abbildung 4.6: Die Geschwindigkeits- und Leistungsindikatoren KHP und $KHPP$ bei verschiedenen Tiefgängen

5 Ermittlung Lastkollektive

Für die Ermittlung der Lastkollektive wird zunächst das tatsächliche Operationsprofil des Schiffes ausgewertet. Es ergibt sich für das untersuchte *Containerschiff* eine Häufigkeitsverteilung des Betriebs, siehe Abbildung 5.1. Hierin sind alle aufgezeichneten Betriebszustände aus der Messung inkludiert, eine Filterung, wie im Kapitel 4 fand nicht statt. In dem oberen Teil werden die Betriebszustände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit-Leistung und Drehzahl-Leistung dargestellt. Es ergeben sich einzelne Zustände, in denen das Schiff sehr geringe Geschwindigkeiten fährt. In der Häufigkeitsverteilung haben diese Zustände keinen signifikanten Beitrag zum Gesamtprofil. Es zeigt sich, dass das untersuchte Schiff maßgeblich in einem Geschwindigkeitsbereich von 14 – 20 *kts* bei mittleren Tiefgängen von ca. $T = 13 - 16 m$ unterwegs ist.

Aus dem Schiffsbetrieb sind keine Daten zum Schub des Propellers verfügbar. Aus diesem Grund muss dieser für einzelne Zustände mittels numerischer Methoden berechnet werden. Hierfür müssen Geschwindigkeits-Drehzahl-Leistungs-Punkte gefunden werden, für die eine Leistungsprognose inkl. Schubrechnung durchgeführt wird. Hierbei ist zunächst überprüft worden, inwieweit die gemittelten Werte für Leistung und Drehzahl mit den Prognosen aus den CFD-Simulationen in den einzelnen Zuständen übereinstimmen. Dies ist eine Vereinfachung, da es in den gewählten Zuständen keine statistischen Aussagen dazu gibt, inwieweit diese Repräsentativ für den Zustand sind, oder sich maßgeblich aus extremen Werten (Minima oder Maxima) des Zustandes zusammensetzen. In der Abbildung 5.2 sind die Prognosen der CFD (*Service*) für $T = 12 m$



Operation Profile		Ship speed [kts]										
		2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	>22
Draught [m]	<11	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,21%	0,02%	0,01%	0,52%	4,07%	0,00%
	11-12	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,04%	1,12%	2,04%	0,44%	0,20%	0,32%	0,00%
	12-13	0,01%	0,00%	0,01%	0,04%	0,76%	1,98%	8,09%	0,84%	1,60%	3,66%	0,00%
	13-14	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%	2,48%	3,10%	10,54%	1,32%	2,88%	3,33%	0,00%
	14-15	0,02%	0,03%	0,03%	0,01%	3,05%	3,78%	12,32%	60%	4,10%	2,06%	0,00%
	15-16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,23%	1,65%	2,15%	1,58%	13,81%	4,13%	0,01%

Abbildung 5.1: Operationsprofil des Containerschiffes

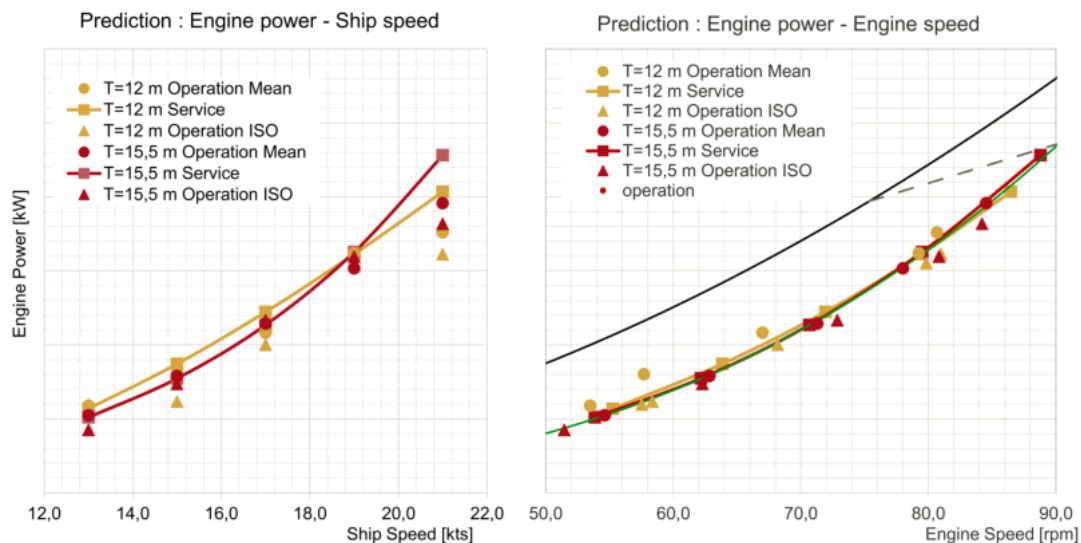


Abbildung 5.2: Gemittelte Leistungsaufnahme und Drehzahl aus dem Betriebsprofil gegenübergestellt mit den CFD-Prognosen für den Zustand *Service*

und $T = 15,5 m$ den Mittelwerten der ungefilterten Messung (*Operation Mean*) und gefilterten Messung (*Operation ISO*) gegenübergestellt. Wenn die Punkte, Dreiecke und Vierecke für die entsprechenden Tiefgängen zusammenliegen, ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Prognose und gemittelten Messwerten für die Schiffsgeschwindigkeit und Drehzahl mit der Leistung. Es ist zu erkennen, dass dies insbesondere für den kleinen Tiefgang von $T = 12 m$ nicht gut übereinstimmt. Das Schiff fährt in der Realität bei den Schiffsgeschwindigkeiten mit anderer Leistung und Drehzahl, was bedeutet, dass der Propeller mehr belastet oder entlastet operiert. Da diese Punkte keiner klaren Tendenz folgen, scheint es sich hier um Effekte zu handeln, die Betriebszustandsabhängig sind und keiner grundlegenden Annahme, wie zum Beispiel Widerstandserhöhung durch Bewuchs folgen. Für den größeren Tiefgang $T = 15,5 m$ ergibt sich eine klare Korrelation zwischen Prognose und Mittelwerten der Messung. Hier zeigt nur die höchste Geschwindigkeitsklasse eine starke Abweichung zur Prognose.

Die Auswertung zeigt, dass es schwierig ist für die gemittelten Messwerte direkt einen Schub aus einer Leistungsprognose zu generieren. Es müsste für jeden Punkt eine einzelne Anpassung/Widerstandskorrektur durchgeführt werden, damit der zu dem Punkt gültige Schub ermittelt wird. Da davon auszugehen ist, dass aber bei einer Mittelung der Werte über eine lange Zeit es nur systematische Abweichungen geben kann, ist dies nicht sinnvoll. Es wird sich daher der Werte der Leistungsprognosen aus der CFD für die Ermittlung von Lastkollektiven bedient.

Für den aus der Prognose ermittelten Propulsionszustand wird mit Hilfe eines Wirbelgitterverfahrens die Last auf den Flügel im Nachstrom ermittelt. Hierfür wird der Propeller im nominellen Nachstrom des Schiffes simuliert. Die Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft die Eingangsdaten, Prozedur und das Ergebnis des Verfahrens. Für die Bewertung der Flügelfestigkeit sind der maximale, mittlere und minimale Flügelschub, sowie deren Angriffspunkt von Bedeutung.

Mit Hilfe der Methode sind für die repräsentativen Zustände die erforderlichen Schub-Werte über den Flügelumlauf ermittelt worden. Diese sind in das Verhältnis zum entsprechenden Schub bei der üblichen Flügeldimensionierung gesetzt worden, welche bei MCR-Zustand ermittelt wird.

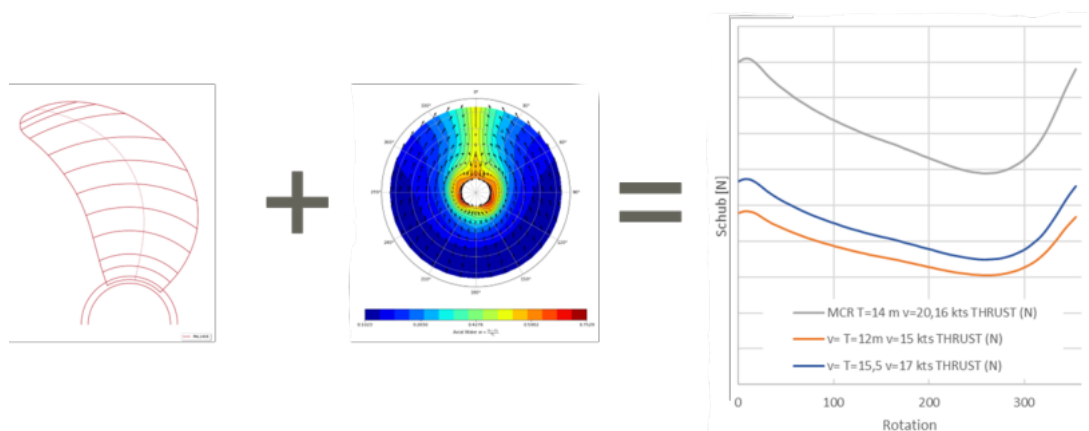


Abbildung 5.3: Ablauf zur Ermittlung der Flügellast mit Hilfe eines Wirbelgitterverfahrens

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5.4 dargestellt. Wie zu erwarten ist, liegen die sich hieraus ergebenden Lasten geringer, als im MCR-Zustand. Die Schubwerte können gekoppelt mit der Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte in ein Lastkollektiv überführt werden und für die Bauteilbemessung genutzt werden.

Die entwickelte Methode kann mit Hilfe von beliebigen Messdaten oder Prognosen angewendet werden. Sie ist nicht auf ein Schiff begrenzt. Die Charakteristik der Flügellast aus dem verwendeten Wirbelgitterverfahrens ist maßgeblich durch die Nachstromverteilung beeinflusst. Diese

min Thrust [%]		Ship speed [kts]		
		14-16	16-18	18-20
Draught [m]	12-13	52%	65%	74%
	13-14	48%	60%	71%
	14-15	40%	57%	71%
	15-16	46%	59%	75%

(a) Minimaler Schub

mean Thrust [%]		Ship speed [kts]		
		14-16	16-18	18-20
Draught [m]	12-13	52%	66%	77%
	13-14	49%	62%	73%
	14-15	46%	59%	73%
	15-16	47%	61%	77%

(b) Gemittelter Schub

max Thrust [%]		Ship speed [kts]		
		14-16	16-18	18-20
Draught [m]	12-13	53%	67%	80%
	13-14	51%	64%	77%
	14-15	48%	61%	77%
	15-16	49%	63%	80%

(c) Maximaler Schub

Abbildung 5.4: Ermittelter Schub des Propellerflügels für die Festigkeitsauslegung bei repräsentativen Operationszuständen normiert mit dem jeweiligen Schub in der üblichen Festigkeitsauslegung

wird für das Schiff häufig über Tiefgang und Geschwindigkeit als konstant angenommen. Daher ist im weiteren zu prüfen, inwieweit eine Änderung der Nachstromverteilung für Tiefgang und Geschwindigkeit Einfluss auf die Charakteristik und damit auf die Schwankung im Schub haben.

6 Identifikation von Operationsprofilen und Einsparpotentialen

Durch den Partner *URO* sind innerhalb des Vorhabens *AIS*-Informationen zu verschiedenen Schiffen über einen langen Aufzeichnungszeitraum bei *AIS*-Providern beschafft worden. An der Auswahl der Schiffe ist die *MMG* beteiligt worden, sodass für diese ebenfalls Propulsionsprognosen erstellt werden können. Hierbei sind für die *MMG* folgende Schiffstypen von Interesse

- Schwesterschiffe zum untersuchten 14 0000TEU Containerschiff
- Schiffe mit *MMG ReDesign* Propeller

Mit Hilfe der *AIS*-Informationen soll zum einen überprüft werden inwieweit

- Schwesterschiffe ein vergleichbares Operationsprofil, wie das untersuchte Schiff aufweisen
- und welche Effizienzverbesserungen sich für *MMG ReDesign* Propeller über das Betriebsprofil ergeben.

In den *AIS*-Informationen eines Schiffes werden keine Angaben zu Leistung und Drehzahl der Hauptmaschine übertragen. Diese müssen also mit Hilfe von zusätzlichen Propulsionsprognosen auf der Basis von

- Widerstandskurven,
- Freifahrtskennlinien des Propellers
- und Wechselwirkungsparametern zwischen Rumpf und Propeller

generiert werden. Für die Schiffe, welche bei der *MMG* verfügbar sind, ist dies über Modellversuchsberichte und CFD-Reports möglich.

Zudem sind Wetterinformationen in den *AIS*-Daten nicht verfügbar. Externe andere Quellen für das Wetter sind nicht hinreichend vorhanden gewesen. Insgesamt standen die *AIS*-Daten von 8 Schiffen zur Verfügung, für welche Daten bei der *MMG* verfügbar sind.

Hierbei wird im folgenden detaillierter auf vier Schiffe in der gleichen Schiffsgröße von 4 250TEU eingegangen. Für jedes Schiff lagen mehr als 100 000 Datensätze zur Verfügung. Die Schiffe haben ähnliche Hauptabmessungen und ähnliche Propellerabmessungen. Die Verteilung von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund und der Tiefgänge des Schiffes sind in der Abbildung 6.1 dargestellt. Hierbei wurden Schiffsgeschwindigkeiten unter $1kn$ ausgeblendet, weil die Schiffe hier im Hafen oder vor Anker liegen. Diese machen ca. 40-50% der Gesamtdaten aus. Die Verteilungen zeigen, dass die Schiffe relativ gleich häufig mit Tiefgängen um den Entwurfstiefgang von $T = 10,5m$ bzw. $T = 11,0m$ operieren. Lediglich Schiff 3 fällt hier etwas auf mit einem Ausreißer bei $T = 11 - 12m$. Bei der Geschwindigkeit fällt auf, dass sich alle Schiffe im Betrieb

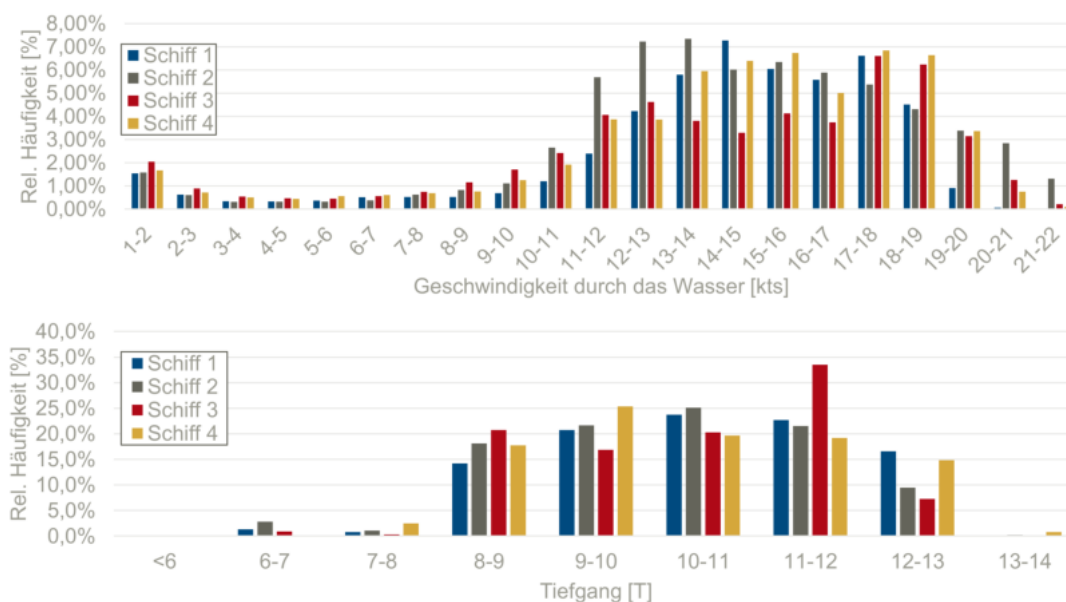


Abbildung 6.1: Operationsprofile für 4 250TEU Schiffe extrahiert aus den AIS-Daten für Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang

am häufigsten zwischen $10kn - 20kn$ bewegen, wobei die Verteilung je nach Schiff hin zu der oberen, bzw. unteren Grenze schwankt. Diese ist aber wesentlich geringer als die ursprüngliche Entwurfsgeschwindigkeit von ca. $25kn$.

Für die Schiffe liegen Modellversuchs- und CFD-Berichte vor, sodass anhand des Betriebsprofils eine Leistungsprognose ermittelt werden kann. Diese werden üblicherweise nur für einen kleinen Tiefgangsbereich und eine begrenzte Anzahl an Schiffsgeschwindigkeiten erstellt. Aus den AIS-Informationen geht nicht hervor, wann Umbauten an einem Schiff durchgeführt wurden. Es besteht somit immer eine Unsicherheit und die auf Basis von den Informationen generierten Daten können daher nicht als allgemeingültig angesehen werden. Für das *Schiff 1* aus der Abbildung 6.1 ist beispielhaft in der Abbildung 6.2 dargestellt, für welche Tiefgangs- und Geschwindigkeitsbereiche sich mit den vorhandenen Schiffsinformationen eine Leistungsprognose erstellen lässt. Hierbei werden für Zwischentiefgänge die Widerstandswerte mit Hilfe der Admiraltätsformel korrigiert. Der Schiffseinflussgrad aus der Propulsion wird konstant angenommen und aus der dem Tiefgang und Geschwindigkeit nächst liegenden Punkt ermittelt. Aus der Abbildung ergibt sich, dass ein maßgeblicher Anteil ohne die aufwendige Generierung von zusätzlichen Widerstandskurven, oder Propulsionssimulationen durch die vorhandenen Daten abgedeckt werden kann. So entsprechen die hierdurch möglichen Prognosen ca. 62 % der Reisezeit des Schiffes.

Für das in Abbildung 6.2 gezeigte Operationsprofil werden anhand der Ausgangskonfiguration und einem abgeleiteten Retrofit-Entwurf des Propellers neue Leistungsprognosen erstellt. Im Retrofit-Fall ist zusätzlich die Schiffsförmung durch eine Bugwulst-Modifikation an das neue Betriebsprofil angepasst worden. Die daraus resultierenden Leistungsprognosen sind in Abbildung 6.3 gezeigt. Es ergeben sich aus dem Retrofit Effizienzsteigerungen über das gesamte Einsatzprofil, welche bei geringen Geschwindigkeiten maximal sind und hin zu hohen Geschwindigkeiten geringer werden. Die Einsparungen ergeben sich durch ein wesentlich verändertes Betriebsprofil im Laufe des Schiffslebens, hierdurch ist es möglich Propeller und Schiffsförmung anzupassen.

		Speed over Ground [kts]																						
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
Draught [m]	<6	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
	6-7	1,31%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
	7-8	0,59%	0,05%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	8-9	4,91%	0,32%	0,13%	0,03%	0,05%	0,04%	0,07%	0,06%	0,08%	0,14%	0,30%	0,50%	0,78%	1,21%	0,90%	0,62%	1,02%	1,89%	0,97%	0,14%	0,02%	0,00%	0,00%
	9-10	9,62%	0,43%	0,13%	0,07%	0,05%	0,07%	0,12%	0,10%	0,15%	0,20%	0,51%	0,96%	1,76%	1,98%	1,01%	0,90%	0,86%	0,96%	0,78%	0,08%	0,01%	0,00%	0,00%
	10-11	15,76%	0,36%	0,18%	0,09%	0,07%	0,10%	0,13%	0,13%	0,09%	0,13%	0,20%	0,50%	0,68%	0,65%	1,45%	0,80%	0,39%	1,02%	0,87%	0,09%	0,02%	0,00%	0,00%
	11-12	13,03%	0,22%	0,10%	0,09%	0,09%	0,09%	0,11%	0,13%	0,11%	0,11%	0,11%	0,22%	0,47%	1,04%	1,62%	1,01%	1,23%	1,24%	1,29%	0,38%	0,01%	0,01%	0,00%
12-13	4,72%	0,17%	0,08%	0,05%	0,05%	0,06%	0,07%	0,10%	0,07%	0,10%	0,07%	0,21%	0,52%	0,89%	2,29%	2,70%	2,08%	1,50%	0,59%	0,22%	0,02%	0,00%	0,00%	
13-14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

~31 % der Gesamtzeit
~62 % der Reisezeit

Abbildung 6.2: 4 250TEU Schiff 1: Operationsprofil und Tiefgangs- und Geschwindigkeitsbereich für die Leistungsprognose

		Speed over Ground [kts]							
		14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
Draught [m]	8-9	18,2%	21,3%	25,7%	29,5%	33,0%	37,7%	42,6%	
	9-10	17,9%	21,3%	24,8%	29,1%	32,9%	37,3%	42,4%	47,6%
	10-11	17,7%	20,8%	24,5%	29,2%	32,7%	38,4%	45,0%	
	11-12	18,3%	21,9%	26,6%	31,4%	35,6%	40,8%	47,6%	52,0%
	12-13	18,6%	22,4%	26,6%	31,6%	37,1%	43,0%	50,8%	

(a) Original Entwurf

		Speed over Ground [kts]							
		14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
Draught [m]	8-9	13,8%	16,6%	20,4%	23,8%	27,1%	31,9%	36,9%	
	9-10	14,1%	17,2%	20,6%	24,7%	28,3%	32,0%	36,8%	41,9%
	10-11	15,1%	17,8%	21,1%	25,6%	29,0%	34,7%	41,3%	
	11-12	16,3%	19,4%	23,7%	28,2%	32,2%	37,3%	44,0%	48,1%
	12-13	16,8%	20,0%	23,7%	28,5%	33,8%	39,6%	47,2%	

(b) Redesign Propeller-Entwurf mit modifiziertem Bugwulst

		Speed over Ground [kts]							
		14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
Draught [m]	8-9	24%	22%	21%	19%	18%	15%	13%	
	9-10	21%	19%	17%	15%	14%	14%	13%	12%
	10-11	15%	14%	14%	13%	11%	10%	8%	
	11-12	11%	11%	11%	10%	10%	9%	8%	7%
	12-13	10%	11%	11%	10%	9%	8%	7%	

(c) Einsparung in der Maschinenleistung

Abbildung 6.3: 4 250TEU Schiff 1: Prognose der relativen Maschinenleistung für das Betriebsprofil auf Basis AIS-Daten: Vergleich zwischen der Originalkonfiguration und einer Redesign Konfiguration

Auf Basis der AIS-Daten und der daraus resultierenden Propulsionsprognose können ebenfalls mögliche Einsparungen im Verbrauch über ein Jahr abgeleitet werden. Dies wird in diesem Fall für das Betriebsprofil aus dem Jahr 2019 des Schiffes erarbeitet. In diesem Jahr stehen insgesamt 18 000 AIS-Daten zur Verfügung, was ca. 50% der Zeit eines Jahres entsprechen. Das darauf resultierende Betriebsprofil ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Eine Leistungsprognose kann nur für die enger eingegrenzten Tiefgänge und Geschwindigkeiten erstellt werden, für welche Widerstands- und Propulsionskurven vorliegen, welche durch 35% der vorhandenen AIS-Daten repräsentiert werden. Auf Basis eines durchschnittlichen Verbrauchs von 171g/kWh können damit die Einsparungen an Brennstoff für das Operationsprofil kumuliert werden. Dieses ist in der Abbildung 6.5 gezeigt. Insgesamt ergibt sich damit eine Einsparung am Schiff von min. 275t

Brennstoff über die Datensätze. Die absoluten Einsparungen liegen jedoch höher, da nur 18% der Zeit des Jahres in die Auswertung einfließen.

Mit Hilfe der Methoden ist es möglich sich Betriebsprofile aus *AIS-Daten* zu generieren und mit Hilfe dieser Profile Retrofit-Maßnahmen zu überprüfen. Hierdurch wird relativ einfach überprüft, inwieweit eine Maßnahme umfangreiche Einsparungen im geforderten Betriebsbereich ergibt, oder ob diese angepasst werden muss. Aufgrund der fehlenden Umgebungsdaten zu Wetter und Fahrtgebiet, können diese Maßnahmen nur auf Basis von Leistungsprognosen mit fester Sea-Margin überprüft werden. Für die Kopplung mit von dem Partner *UDE* entwickelten Zusatzwiderstandsprognosen müssen Umgebungsdaten berücksichtigt werden.

		Speed over Ground [kts]																			
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
Draught [m]	8-9	0,11%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,04%	0,03%	0,01%	0,05%	0,04%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	9-10	9,64%	0,17%	0,11%	0,09%	0,04%	0,11%	0,13%	0,11%	0,16%	0,16%	0,24%	0,33%	0,73%	1,14%	1,99%	1,73%	1,00%	0,26%	0,20%	0,01%
	10-11	16,61%	1,02%	0,59%	0,11%	0,02%	0,12%	0,09%	0,10%	0,10%	0,29%	0,36%	0,77%	1,14%	1,73%	6,06%	1,92%	0,51%	0,57%	0,68%	0,03%
	11-12	10,46%	0,17%	0,06%	0,05%	0,07%	0,03%	0,08%	0,10%	0,10%	0,08%	0,12%	0,46%	0,59%	2,03%	2,39%	1,32%	0,47%	0,66%	0,41%	0,00%
12-13	3,15%	0,12%	0,06%	0,03%	0,08%	0,07%	0,09%	0,09%	0,06%	0,32%	0,17%	1,00%	2,79%	4,31%	9,67%	5,59%	0,60%	0,37%	0,30%	0,00%	

Abbildung 6.4: 4 250TEU Schiff 1: Operationsprofil im Jahr 2019

		Speed over Ground [kts]					
		14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
Draught [m]	8-9	0,05%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	9-10	5,15%	4,86%	2,81%	0,72%	0,57%	0,02%
	10-11	16,15%	5,40%	1,44%	1,59%	1,91%	0,09%
	11-12	6,26%	3,70%	1,32%	1,85%	1,16%	0,00%
	12-13	25,57%	15,74%	1,70%	1,04%	0,84%	0,00%

Abbildung 6.5: 4 250TEU Schiff 1: Mögliche Brennstoffeinsparungen im Jahr 2019

7 Veröffentlichungen

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

- Jabary, W., Sprenger, F., Kleinsorge, L., Baumfalk, H., Mewes, S., Neugebauer, J., Jiang, C., el Moctar, O. (2022): Development of a Unified Data Model to Improve Ship Operational Performance Analyses in *Proceeding of 21st Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '22)*, Pontignano, Italy, June 2022.
- Jabary, W., Liu, C., Sprenger, F., Kleinsorge, L., Baumfalk, H., Kaster, M., Mewes, S., Neugebauer, J., el Moctar, O. (2023): Development of machine learning approaches to enhance ship operational performance evaluation based on an integrated data model in *Proceedings of the 33rd (2023) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, Ottawa, Canada, June 2023.
- Es wurden Kunden bei Messen, Vorträgen in Firmenpräsentationen und durch den Firmen-Newsletter fortlaufend über den aktuellen Stand des Projektes in Kenntnis gesetzt.

Es ist geplant fortlaufend – auch nach Ende des Vorhabens – die erzielten Ergebnisse und darauf aufbauende Anwendungsfälle durch Publikationen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilvorhabens DigitProp sind Methoden zur Bewertung der Propulsionseffizienz anhand von Betriebsdaten entwickelt worden.

Hierzu musste zunächst eine einheitliche Datenbasis für die Untersuchungen und Entwicklungen geschaffen werden. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ist hierfür ein Containerschiff des assoziativen Partners ausgewählt worden, auf dem kontinuierlich über die Projektlaufzeit Betriebsdaten gemessen und gespeichert wurden. Zusammen mit den Partnern sind die zu messenden Parameter, deren Messintervall, sowie die zusätzlich zu beschaffenen externen Datenquellen (Wetter, Seegang, etc.) erarbeitet worden. Das erstellte Messkonzept wurde an Bord realisiert. Die erfassten Daten sind in einer Datenbank beim Partner *URO* gesammelt worden und standen zur Verfügung. Alle für die Schiffspropulsion nötigen Entwurfsinformationen sind innerhalb des Vorhabens mit Hilfe von CFD-Simulationen von Widerstand, Freifahrt des Propellers und Propulsion innerhalb des Projektes erarbeitet worden.

Auf Basis der gesammelten Betriebsdaten sind im Vorhaben Entwicklungen von Filter-, Validierungs- und Analysemethoden durchgeführt worden. Diese bauen auf der *ISO 19030* auf und sind durch Eigenentwicklungen erweitert worden. Mit dem entstandenen System ist es möglich Betriebsdatenanalysen durchzuführen und diese auf Basis der internen Prognosedaten auszuwerten. Dies bietet die Möglichkeit Messdaten bzgl. verschiedener Effekte aus dem Betrieb zu filtern und analysieren. Mit diesen Ergebnissen sollten Empfehlungen für den Schiffsbetrieb ausgearbeitet werden. Die Untersuchungen im Vorhaben zeigen, dass dies nur begrenzt möglich war. Während die generelle Performance des Betriebes über den Untersuchungszeitraum bewertet werden kann, ist es nur möglich Empfehlungen für den Schiffsbetrieb zu generieren, wenn Prognose und Messung gut übereinstimmen.

Die Methoden zur Betriebsdatenauswertung sind im Weiteren genutzt worden um schiffsspezifische Operationsprofile abzuleiten und für diese die Belastung des Propellerflügels für die Festigkeitsauslegung zu erarbeiten. Diese Vorgehensweise ist mit einer Kopplung der Ergebnisse aus dem Betrieb an ein Wirbelgitterverfahren durchgeführt worden. Damit ist es möglich Lastkollektive zu erarbeiten. Diese hängen aber maßgeblich von der Nachstromverteilung ab. Das Modell soll zukünftig erweitert werden.

Häufig liegen aus dem Schiffsbetrieb nicht genügend Daten zur Schiffspropulsion vor. Dies gilt insbesondere, wenn auf schlichten Datenquellen, wie AIS-Informationen Operationsprofile generiert werden sollten. Für den Partner *URO* sind in dem Vorhaben Prognosemethoden entwickelt worden, welche basierend auf Leistungsprognosen den Propulsionszustand ermitteln. Damit ist es möglich fehlende Daten aufzufüllen, oder zu ergänzen.

Literaturverzeichnis

- [1] ISO. ISO 19030-2: Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance - Part 2: Default method.