

Wissenschaftlicher Abschlussbericht „GreenSailer“



M. Vahs, M. Bentin
D. Elger, C. Schnabel

31.10.2021

Hochschule Emden/Leer
Fachbereich Seefahrt & Maritime Wissenschaften





Zusammenfassung

In dem Projekt „GreenSailer“ wurde zwischen 2016-2020 am Fachbereich Seefahrt & Maritime Wissenschaften der Hochschule Emden/Leer der Prototyp eines innovativen Frachtseglers für die Küstenschifffahrt und zur Versorgung von Inseln entwickelt, der das Leitbild des „Zero Emission Ship“ weitestgehend erfüllen kann. Bei der Entwicklung wurden zahlreiche z. T. bereits vorhandene technische Teillösungen in ein Gesamtkonzept integriert, um ein Schiff mit starker Zukunftsrelevanz im Detail zu entwerfen.

Für ein breites Nutzungspotenzial des Schiffes wurden bei der Erstellung des Schiffsentwurfs und Betriebskonzeptes sowohl der Transport von Ladung und Passagieren, als auch die Nutzung als Ausbildungs- und Forschungsschiff berücksichtigt.

Abbildung oben: Künstlerische Darstellung von Schön (2020).

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	6
AP 0: Management	8
0.1. AP 0P: Projektmanagement	8
0.2. AP 0E: Engineering Verwaltung	10
AP 1: Analyse und Beschreibung	12
1.1. Vergleichbare Projekte	13
1.1.1. Eingestellte Konzeptstudien und Entwürfe	13
1.1.2. Laufende Projekte in der Entwicklung	13
1.1.3. Realisierte Neuentwürfe und Prototypen	16
1.1.4. Passagierschiffahrt	21
1.1.5. Windzusatzantriebe	22
1.1.6. Schiffe mit Flettner-Rotoren	24
1.2. Marktanalyse	26
1.3. Routenanalyse	27
1.4. Missionsprofil	29
1.5. Spezifikation	30
1.5.1. Schiffstyp	31
1.5.2. Klassennotation und Vorschriften	32
1.5.3. Einsatzprofil	32
1.5.4. Hauptdaten	33
1.5.5. Kapazitäten	35
1.5.6. Forschungsequipment	39
1.5.7. Schiffstechnik	39
1.5.8. Referenzen	43
AP 2: Schiffsentwurf	45
2.1. Raumkonzept	45
2.2. Linienriss	49
2.3. Schiffswiderstand	51
2.3.1. Glattwasserwiderstand	51
2.3.2. Seegangseigenschaften	59

2.4.	Manövriersysteme	61
2.4.1.	Auslegung der Hauptmaschine	61
2.4.2.	Auslegung des Propellers	63
2.4.3.	Auslegung des Ruders	64
2.4.4.	Auslegung des Querstrahlers	66
2.5.	Zero emission ship	67
2.5.1.	Wasserstoff als Brennstoff	67
2.5.2.	Methanol als Brennstoff	70
2.5.3.	Anwendung im GreenSailer	71
2.6.	Stabilität	72
2.6.1.	Intaktstabilität	73
2.6.2.	Leckstabilität	79
2.7.	Freibord	80
AP 3: Schiffskonstruktion		81
3.1.	Modellierung von Vergleichsschiffen	81
3.2.	Ausgangsentwurf	84
3.3.	Beschreibung der Stahlkonstruktion	86
3.4.	Bauspantenraster	87
3.5.	Modellierung in Poseidon	88
3.6.	Modellierung in Siemens NX	90
3.7.	Gewichtsrechnung	91
AP 4: Windantriebstechnik		92
4.1.	Vergleich von Segelantrieben	92
4.2.	Berechnung der Druckpunkte	94
4.2.1.	Bestimmung des Segeldruckpunkts	94
4.2.2.	Bestimmung des Lateraldruckpunkts des Rumpfes	95
4.3.	Berechnung der Segelkräfte	97
4.4.	Flettner-Auslegung	106
4.5.	Hochsegelrigg-Auslegung	108
4.5.1.	Mastberechnung	108
4.5.2.	CFD-Untersuchung	112
4.5.3.	FEA-Untersuchung	115
AP 5: Schiffstechnik		120
5.1.	Bordnetz	120
5.1.1.	Energiebedarf	120
5.1.2.	Energieerzeugung	125
5.1.3.	Energiespeicherung und Batterieauslegung	125

5.2. Maschinenraumkomponenten	128
5.2.1. Pumpenauslegung	133
5.3. Brückengestaltung	137
5.4. Forschungseinrichtungen	138
5.4.1. Mehrzweckraum	138
5.4.2. Kräne und Winden	139
5.4.3. Mehrzweckboot	139
5.4.4. Sonstige Ausstattung	139
AP 6: Schiffssicherheit und Beladungstechnik	141
6.1. Schiffssicherheit	141
6.1.1. Rettungseinrichtungen	142
6.1.2. Feuerlöscheinrichtung	144
6.2. Beladungstechnik	151
AP 7: Ausbildungskonzept	153
7.1. Model Course	153
7.2. Zeitplan	155
7.3. Lehrplan	156
7.3.1. Handhabung des Segelsystems	157
7.3.2. Navigation	157
7.3.3. Manövrieren	157
7.3.4. Intakstabilität	158
7.3.5. Sicherheit	158
7.3.6. Technologie	159
7.4. Blended Learning-Modul	160
AP 8: Wirtschaftskonzept	161
8.1. Kosten	162
8.2. Finanzierung	164
8.3. Berechnungen	165
8.3.1. Schwerpunkt Fracht	166
8.3.2. Schwerpunkt Labor	167
8.3.3. Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	167
Literaturverzeichnis	169
Abkürzungsverzeichnis	177
Nomenklatur	178

Abbildungsverzeichnis	183
Tabellenverzeichnis	186
A. Anhang	189
A.2. Schiffsentwurf	189
A.2.1. Hydrostatik	189
A.2.2. Frischwasserverbrauch	193
A.2.3. Intaktstabilitätsrechnung	193
A.2.4. Leckstabilitätsrechnung	199
A.2.5. Freibordrechnung	204
A.3. Schiffskonstruktion	206
A.3.1. FEM-Modellierung in Poseidon/GLFrame	206
A.3.2. Bauspantenraster	209
A.4. Windantriebstechnik	211
A.4.1. Berechnung des Segelflächenschwerpunkts	211
A.4.2. Polardiagramm Schiffsgeschwindigkeiten	215
A.4.3. CFD-Gitter	216

Einleitung

„Ship Efficiency“ ist eines der wichtigsten Themen sowohl vor dem Hintergrund des Klimawandels als auch für Reedereien, die ihre Flotten wettbewerbsfähig halten wollen, denn Kraftstoff ist der dominante Kostenfaktor im Schiffsbetrieb. Es hat sich in den vergangenen Jahren ein breites Spektrum von technischen Innovationen zur Verbesserung der Effizienz gebildet. Eine Option ist der Einsatz von unterstützenden Segelantrieben. Die Nutzung der Windenergie in der Schifffahrt stellt zugleich eine langfristige Perspektive zur Lösung der Klimaproblematik dar. Ebenfalls von besonderem Interesse ist der Schiffsverkehr im küstennahen Bereich. Zum einen ist der Kraftstoffaufwand pro Ladungseinheit und/oder Passagier auf kleineren Küstenschiffen aufgrund von Maßstabeffekten besonders hoch, zum anderen herrscht ein besonderes Interesse an der Reduktion von schädlichen Emissionen in den dicht bewohnten und touristisch bedeutsamen Küstenregionen. Der Einsatz von regenerativer Energie durch Segelantriebe stellt eine interessante Perspektive dar.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen (AP) beschrieben.

AP 0: Management

0.1. AP 0P: Projektmanagement

Das GreenSailer-Projekt war ein Forschungsprojekt des Landes Niedersachsen und wurde darin durch die Regionenkategorie Stärker entwickelte Regionen sowie durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Das Projekt war Teil des Kompetenzzentrums GreenShipping Niedersachsen (GSN), welches während der Projektlaufzeit die in Abbildung 0.1 dargestellte Struktur hatte. Es gliederte sich in eine Forschungs- und eine Netzwerksäule mit der Hochschule Emden/Leer und der MARIKO GmbH in Leer sowie der Jade Hochschule und dem Maritimen Cluster Norddeutschland in Elsfleth.

Die Arbeitspakete sind nach den Kompetenzen unter den Mitarbeitern aufgeteilt worden. Wöchentliche Teambesprechungen erwiesen sich als sehr hilfreich, um fokussiert im Projekt zu arbeiten.

Der Projektfortschritt wurde jährlich zusammen mit den Aktivitäten der Netzwerksäule in einer Steuerungsgruppensitzung dem Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr in Hannover vorgestellt. Daneben gab es regelmäßige Jour fixes mit allen GSN-Beteiligten. Der erste Zwischenbericht ist auf einer

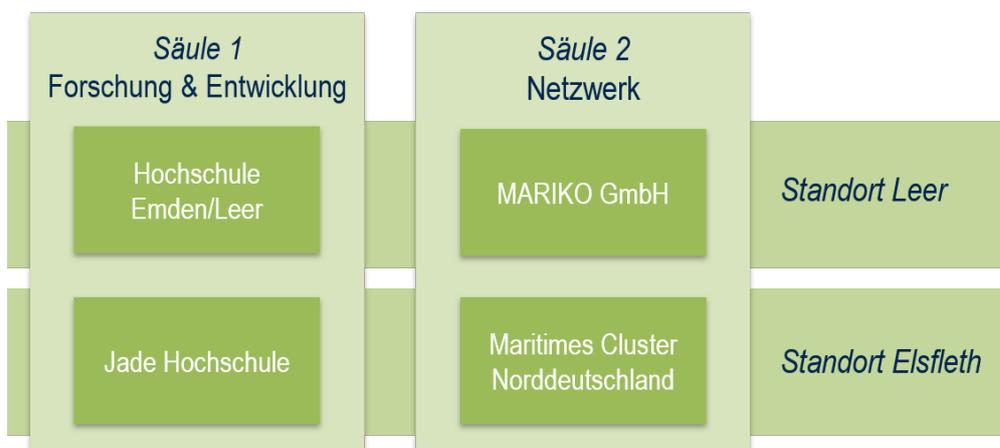


Abbildung 0.1.: Organisationsstruktur des Kompetenzzentrums GreenShipping Niedersachsen

eigens angelegten Website veröffentlicht worden.

Im Juni 2018 wurde das GreenSailer-Projekt auf der GSN-Tagung „Alternative Antriebstechnologien und innovative Assistenzsysteme: Perspektiven für eine emissionsfreie Schifffahrt?“ der Fachwelt in Oldenburg vorgestellt. Eine Postervorstellung erfolgte auf einer weiteren GSN-Tagung „Zero Emission Shipping“ im Januar 2020.

Des Weiteren wurde das Projekt auf einer hochschulinternen Forschungs-Messe mit Poster sowie 2017 auf dem GreenCoast Symposium in Norddeich vorgestellt. Eine Folienschau am Hochschulstand wurde 2018 auf der Maritimen Nacht in Hamburg und 2019 auf der Ideen-Expo in Hannover abgespielt.

Aus der Projektarbeit ist eine Publikation mit dem Titel „Comparison of different methods for predicting the drift angle and rudder resistance by wind propulsion systems on ships“ entstanden, die 2020 in der Fachzeitschrift Ocean Engineering veröffentlicht wurde.

An der Hochschule Emden/Leer hat das Projekt auch Anwendung in der Lehre gefunden wie in Kapitel 4.5 näher beschrieben. Zudem konnten einige Themen als Bachelorarbeiten vergeben werden, wovon das Projekt ebenso profitiert hat:

- Strunk, H.: *Untersuchung potentieller Märkte für den Einsatz eines besonders umweltfreundlichen Schiffes mit Segelantrieb im Rahmen des Projektes „Green Sailer“*. 2016, Bachelorarbeit, Leer
- Besserer, N.: *Entwurf von Brückenlayout und Ausstattung für einen innovativen Frachtsegler im Green Sailer Projekt*. 2017, Bachelorarbeit, Leer
- Quignon, S.: *Konzeptstudie - Sicherheits- und Brandschutzausrüstung für den GreenSailer*. 2017, Bachelorarbeit, Leer
- Boekhoff, C.: *Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des Einsparpotenzials von Schiffen mit windunterstützten Antrieben unter Verwendung von Schiffs-, Routen- und Wetterdaten*. 2017, Bachelorarbeit, Leer
- Sonnenberg, N.: *Ruderentwurf für einen modernen Frachtensegler: Eine Untersuchung von Entwurfsmodellen am Beispiel des „GreenSailer“*. 2019, Bachelorarbeit, Leer
- Jankuhn, P.: *Analyse der angegebenen Leistungsindikatoren verschiedener Windzusatzantriebe für Schiffe und Erarbeitung von Vorschlägen zur Standardisie-*

rung und Verbesserung der Transparenz von Leistungsindikatoren. 2019, Bachelorarbeit, Leer

- Lüken, I.: *Auslegung einer Hybrid-Propulsionsanlage und einer CO₂-emissionsarmen Gesamtenergieversorgung für einen Küstenfrachtsegler.* 2019, Bachelorarbeit, Leer
- Schön, F.: *Konzept und Gestaltung eines modernen Lastenseglers unter ökologischen und ökonomischen Aspekten.* 2019, Masterarbeit, Bremen
- Thaotaku, C.: *Calculating the rigs of the Green Sailor using nonlinear Finite Element Methods.* 2020, Maritime Project in the master program Maritime Operations, Leer
- Lorberg, C.: *Untersuchung der potentiellen wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit eines umweltfreundlichen Schiffes im Rahmen des Projektes GreenSailer.* 2021, Bachelorarbeit, Leer
- Yousofi, I.: *Safety management system for sailing ships – analysis of the specific requirements and possible solutions.* 2021, Maritime Project in the master program Maritime Operations, Leer
- Hofmann, D.: *Finite Elemente-Analyse der Mastenspannung in die Deckstruktur.* 2021, Bachelorarbeit, Leer

0.2. AP 0E: Engineering Verwaltung

Das Projektdatenmanagement (PDM) wurde in Teamcenter aufgebaut. Teamcenter war verknüpft mit der Software Siemens NX, in welcher das Schiffsmodell bezüglich Stahlträger und Innenausrüstung weiter verfeinert und im Detail aufgebaut wurde. Teamcenter diente somit sowohl als Teilebibliothek für das 3D-Modell als auch als zentraler Ablageort für Dokumente.

Das Projekt war zunächst mit einem gezeichneten Entwurf eines Küstenseglers von dem renommierten Designer Horst Glacer gestartet. Die Schiffslinien wurden in die Schiffsdesignsoftware NAPA überführt, um digital damit arbeiten und Berechnungen durchführen zu können. NAPA diente zum allgemeinen Entwurf wie für die Raumaufteilung und Stabilitätsrechnung. Aus NAPA heraus wurden die Spanten des Modells mit einem Skript in die Software Poseidon exportiert. In Poseidon wurde das Stahlgerüst modelliert. Daraus ließ sich das Leergewicht des Schiffes mit seinem Schwerpunkt ermitteln, das wiederum als Eingangsgröße für die Stabilitätsrechnungen in NAPA gebraucht wurde. Die Arbeiten in NAPA und Poseidon wurden parallel

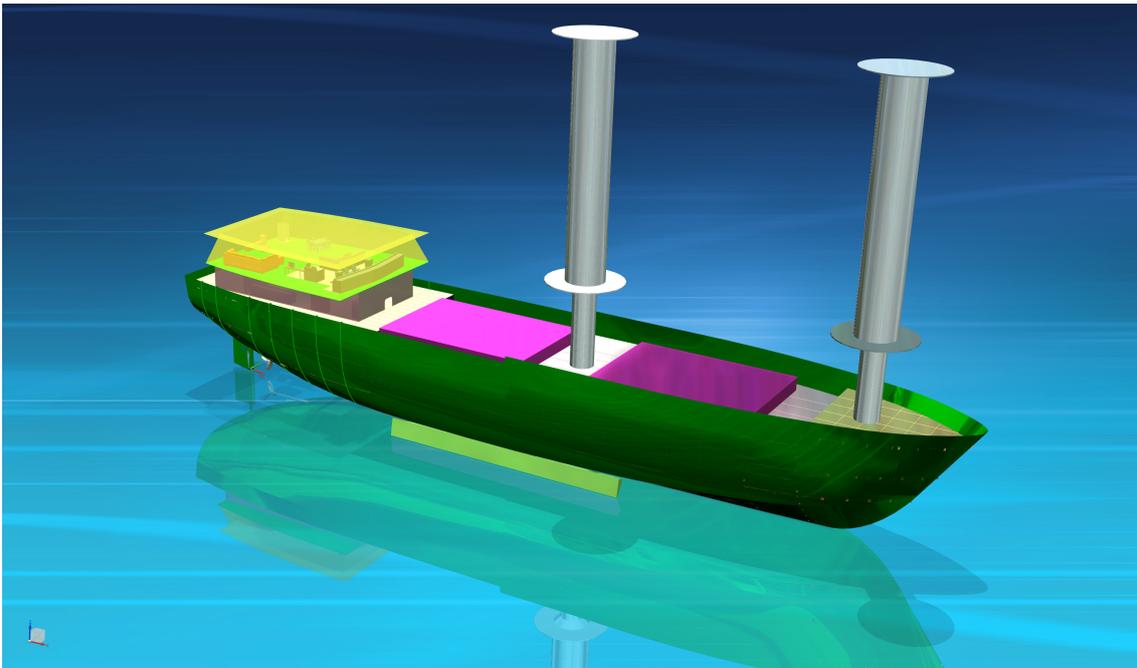


Abbildung 0.2.: Modell in Teamcenter

durchgeführt. Wurde beispielsweise im Designprozess deutlich, dass der Laderaumbereich angepasst werden muss, so mussten diese Änderungen in beiden Modellen erfolgen.

Nach der groben Stahlausrüstung, der Gewichtsabschätzung und der Betrachtung von Lastfällen in Poseidon wurde das Modell in Teamcenter überführt. Hier konnten mit der Teilebibliothek von Siemens NX die Stahlstruktur weiter verfeinert und maschinenbauliche sowie Einrichtungs-Komponenten hinzugefügt werden. Das Modell aus Teamcenter ist in Abbildung 0.2 dargestellt.

AP 1: Analyse und Beschreibung

Bei den sich bereits in Fahrt befindlichen Frachtseglern geht es nicht nur darum, Ladung möglichst umweltfreundlich zu transportieren. Den Abnehmern der Ware geht es immer mehr auch um ein nachhaltigeres und ethisch verantwortungsbewussteres Konsumverhalten. Fairtrade möchte den Handel dahingehend verändern, dass er Bauern und Arbeitern in Entwicklungsländern bessere Preise und anständige Arbeitsbedingungen ermöglicht. Durch den Erwerb nachhaltig produzierter und transportierter Ware identifizieren sich die Kunden mit der Geschichte dahinter. Indem sie Produkte kaufen, die unter Segeln transportiert worden sind, bekommen sie das Gefühl, Teil von etwas Besonderem zu sein, Teil von der starken Gemeinschaft zu sein, die die ethischen Werte hochhält. Daher ist es wichtig, die Geschichte der Ware zu erzählen, von welchen Arbeitern sie wo und unter welchen Bedingungen hergestellt worden ist, und wie sie schließlich mit dem Segelschiff in unsere Breiten gelangt ist. Zudem ist es etwas Besonderes für die Abnehmer, wenn sie selbst mit ihrer Ware mitsegeln können und das Herkunftsland, das Be- und Entladen sowie die Überfahrt mit den natürlichen Elementen Wind und Wasser erleben können. Das hinterlässt einen bleibenden Eindruck und verändert das Konsumverhalten nachhaltig, indem vielleicht weniger, aber mit einer höheren Qualität, und mehr lokal Produziertes gekauft wird (Hurford u. Barker, 2020). Die Vermittlung dieser Werte verfolgen besonders die Betreiber / Reedereien der weiter unten aufgeführten Segelschiffe, die unter der Sail Cargo Alliance fahren. Auf der anderen Seite gibt es auch immer mehr Unternehmen, die ihren CO₂-Fußabdruck verringern wollen und ihre Ware grüner transportieren lassen möchten.

Seit einigen Jahren gibt es Konzepte und auch realisierte Projekte, wie Schifffahrt und der Transport von Ladung umweltfreundlicher gestaltet werden können. Der aktuelle Klimawandel verdeutlicht den dringenden Handlungsbedarf und forciert die Verwendung alternativer Antriebe und die Nutzung regenerativer Energie. Die Konzeptstudie des GreenSailers soll aufzeigen, welche heute verfügbaren innovativen Technologien zu einem ganzheitlichen umweltschonenden Lösungsansatz vereint werden können.

Zu Beginn wurde das Umfeld mit anderen Projekten umrissen, in denen sich der

GreenSailer bewegt. Anschließend wurde eine Marktanalyse auf mögliche Warenströme hin durchgeführt und erörtert, welche Routen der GreenSailer am Beispiel der Ostfriesischen Inseln nehmen könnte. Daraus wurden ein Missionsprofil und ein Lastenheft für die weitere Auslegung abgeleitet.

1.1. Vergleichbare Projekte

Dem Entwurf des GreenSailers entsprechend werden hier nun zunächst nur Projekte mit Tuchsegeln aufgeführt. Später folgen Projekte mit Flettner-Rotoren. Die Analyse vergleichbarer Projekte lässt sich in drei Bereiche unterteilen:

- nicht verwirklichte Konzeptstudien und Entwürfe
- Projekte in der Realisierungsphase
- realisierte und aktuell segelnde Frachtschiffe

1.1.1. Eingestellte Konzeptstudien und Entwürfe

Es gibt eine Reihe von verschiedenen Ansätzen für größere Frachtsegler, deren Realisierung aber seit ihrer Konzeptphase nicht weiter vorangeschritten ist.

Greenheart

2014 wurde das Design des Greenheart-Projekts in Abbildung 1.3 virtuell fertig gestellt und eine Werft in Bangladesch sollte das Schiff bauen. Es war für Fahrten von Kiribati aus zu Inseln im Süd-Pazifik gedacht. Anscheinend ist das Schiff bisher nicht gebaut worden, seit 2015 gibt es keine neuen Nachrichten mehr dazu. Der Entwurf in Abbildung 1.3 ist 32 m lang und hat einen geringen Tiefgang und einen flachen Rumpf für Küsten und Flüsse, der ein Stranden zur Inspektion oder bei Tide erlaubt, sowie Kimmkiele für Flachwasser. Es soll mit PV-Flächen auf dem Dach ausgestattet werden. Am Heck verfügt es über eine RoRo-Rampe. Das Design ist frei zugänglich (Greenheart, 2015).

1.1.2. Laufende Projekte in der Entwicklung

Es werden Projekte vorgestellt, die aktuell noch in der Planungsphase sind, und wo noch ernsthaft eine Verwirklichung angestrebt wird.

Smart Sailing Cargo Ship

TOWT (Trans Oceanic Wind Transport) betreibt in Frankreich mehrere traditionelle Segelschiffe im Verband der maritimen Routen unter Segeln (ARMV und TOWT).

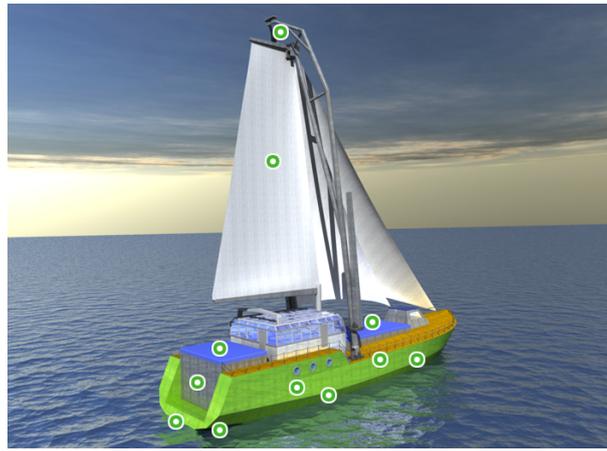


Abbildung 1.3.: Entwurf des Greenheart-Seglers (Greenheart, 2015)



Abbildung 1.4.: Entwurf des „Smart Sailing Cargo Ship“ (TOWT, 2020)

Mit der 32 m langen *Corentin* werden Kaffee, Rum, schwarzer und grüner Tee von den Azoren sowie europäischer Wein transportiert. Die nur 20 m lange *Lun II* bringt Rum und Bio-Kaffee aus der Dominikanischen Republik nach Frankreich. Für europäische und atlantische Reisen werden zusätzlich die Schiffe von Fairtransport gechartert. Regional gecharterte Schiffe entlang der Küste Frankreichs sind: *Nébulouse*, *Biche*, *La Malouine*, *Gothenburg*, *Notre-Dame de Rumengol*, *Michel et Patrick*. Alle Waren werden mit dem Label „Unter Segeln transportiert – mit Respekt für die Umwelt“ versehen.

Für den Bau ihres neuen Schiffes „Voilier-Cargo“ bzw. „Smart Sailing Cargo Ship“ in Abbildung 1.4 hat TOWT eine Schiffseignerstruktur geschaffen, mögliche Ladaungsaufträge gesichert und die Anfangsfinanzierung aufgebracht. Es soll mit 67,50 m Länge 1000 Tonnen Fracht sowie Passagiere bei durchschnittlich 10 kn transportieren können (IWSA-Newsletter 10.2018). In Zusammenarbeit mit ADEME ist es das Ziel, eine neue Generation von Großseglern für den Gütertransport zu entwerfen, die die Kriterien für Kosten, Zuverlässigkeit, Kapazität und Geschwindigkeit erfüllen (TOWT, 2020).



Abbildung 1.5.: Entwurf des „EcoClipper500“ (EcoClipper, 2020)

EcoClipper500

EcoClipper in den Niederlanden hat seit 2018 die Vision, die alten Handelsrouten über den Atlantik, Pazifik und weltweit wieder im Linienverkehr mit regelmäßig verkehrenden Segelfrachtschiffen anzubieten. Da die Händler früher mit dem Wind gesegelt sind, wird auch die *Noah* in Abbildung 1.5 ein Rahsegler sein. Es soll ein Serienschiff aus Stahl werden, das auf dem schnellsten Clipper der Niederlande von 1857 basiert (EcoClipper, 2020). Mit 39,20 m Länge in der Wasserlinie und 9,30 m Breite wird es deutlich kleiner als der GreenSailer, soll aber dennoch 500 t Fracht bei 5 m Tiefgang transportieren können. Zusätzlich zur Crew soll es 36 Trainees und 12 Passagiere mitnehmen können, sodass es insgesamt maximal 60 Personen befördert. Die Segelfläche beträgt 850 m². Zur Orientierung für den GreenSailer können die folgenden Angaben zum Leerschiffsgewicht nützlich sein:

Hull steel plating	84,7 t
Hull steel framing	35,0 t
Deck steel plating	59,7 t
Deck framing	13,3 t
Rigging and sails	47,0 t
Interior and outfitting	34,0 t
Ballast	140,0 t

Neoliner

Neoline möchte wie in Abbildung 1.6 dargestellt Segel auf innovative Autofrachter setzen, die aber auch Projektladung oder 286 TEU transportieren können sollen. Laut THB 232 (2018) plant Renault, zwei Schiffe mit einer Segelfläche von 4150 m² auszurüsten. Sie sollen ab 2021 mit 10 kn nach Kanada bzw. zwischen Frankreich und den USA segeln und brauchen 15 Mann Besatzung. 12 zahlende Passagiere sollen ebenfalls mitfahren können (Kunst, 2018).



Abbildung 1.6.: Entwurf des Autofrachters von Neoline (Kunst, 2018)

1.1.3. Realisierte Neuentwürfe und Prototypen

Mit der Gründung der International Wind Ship Association (IWSA) 2014 gibt es seit kurzem zwei Interessenvertretungen für den industriellen Bereich der Frachtsegelschifffahrt: Die IWSA für u.a. kommerzielle Projekte von Windzusatzantrieben auf großen Handelsschiffen und die Sail Cargo Alliance für traditionelle Segelfrachtschiffe.

Sail Cargo Alliance

Zunächst wird die Sail Cargo Alliance betrachtet, welcher mehrere eigenständige Unternehmen mit einem oder mehreren traditionellen Segelschiffen für den Frachttransport exklusiver Güter angehören. Sie stellen in Europa die derzeitige Flotte an Frachtseglern dar, wobei es noch weitere hier nicht genannte Segler gibt.

Den hier nachfolgend beschriebenen Schiffen ist gemein, dass es sich um historische Schiffe bzw. um Rekonstruktionen oder Umbauten solcher handelt. Ein moderner Entwurf, der sich an den praktischen Erfordernissen orientiert, hat im Vorfeld nicht stattgefunden. Der Fokus dieses Kapitels soll dabei auf Schiffen liegen, die für die Beförderung von Fracht als Transportaufgabe konzipiert worden sind.

Fairtransport setzt die beiden motorlosen Schiffe *Tres Hombres* und *Nordlys* ein. Auf jede Ware setzen sie das A-Label für einen fairen und emissionsfreien Handel. Die Flotte besteht aus den folgenden Schiffen:

Tres Hombres: Transatlantik, Frankreich – Dänemark – England – Frankreich – Spanien. Transportierte Waren: Wein, Ale, Rum, Kakao, Kaffee, Salz, Seife, Zuckersirup, skandinavischer Aquavit. Länge: 32 m, Tiefgang: 3 m, 35 m³ Laderaum. 5 Crew, 10 Trainees oder Gäste.

Nordlys: Entlang der Küste Europas wird Wein, Olivenöl, Apfelwein und English Ale transportiert. Länge: 25 m, Tiefgang: 3 m, 28 m³ Laderaum. 3 Crew, 6 Trainees.

Seit 2017 gibt es Pläne, das Clipper-Schiff *Spirit of Rotterdam* zu restaurieren und einzusetzen.

Die *Grayhound* wurde 2012 von dem gegründeten Familienunternehmen **Grayhound Lugger Sailing** als traditioneller Nachbau aus Holz neu gebaut und transportiert seitdem bis zu 4,5 t französischen Wein, Zwiebeln, Ale, Gin und Wodka über den Englischen Kanal und entlang der Atlantikküste. Sie ist 20 m lang, der Tiefgang beträgt 3,3 m und die Besatzung besteht aus fünf Crewmitgliedern sowie neun Trainees.

Seit Juni 2019 transportiert die *SV Brigantes* bis zu 220 t Kaffee, Kakaobohnen und Rum zwischen der Karibik und dem Mittelmeer.

Timbercoast betreibt die *Avontuur*: Deutschland – Atlantik – Karibik – Pazifik und Südsee-Inseln – Australien. Ladung: Rum. Länge: 44 m, Tiefgang: 2,10 m, 70 t., fünf Crewmitglieder, neun Trainees.

Die **Blue Schooner Company** besitzt den Zweimaster *De Gallant*, welcher in Nordeuropa unterwegs ist.

Havila ist 32 m lang und transportiert Bio-Lebensmittel in Europa. Sie bietet eine Ausbildungs- und kulturelle Plattform an, um Themen wie Globalisierung und Nahrungsmittelketten anzusprechen.

TOWT gehört ebenfalls zur Sail Cargo Alliance. Hier endet zunächst die Aufzählung der Schiffe, die unter der Sail Cargo Alliance fahren. Alle Schiffe nehmen zahlende Gäste mit, die bei sämtlichen anfallenden Arbeiten wie Ladung verstauen, Decksarbeit und natürlich bei der Segelhandhabung mithelfen und somit das Projekt unterstützen.

Kwai

Die SV Kwai fährt seit 2006 unter Island Ventures Limited von Honolulu (Hawaii) über Kiribati zu den Cook Islands. Eine Rundfahrt dauert zwei bis drei Monate. Von Hawaii wird bestellte Ware günstig zu den anderen Inseln gebracht, zurück transportiert sie getrockneten Seetang und getrocknete Kokosnüsse. Ein weiteres Angebot sind Abenteuer-Reisen zu entlegenen Inseln, geführtes Fischen und Schnorcheln sowie Landexkursionen. Stichwort Eco-Tourist. Die Pazifik-Inseln können ohne politisches Risiko bereist werden. An Bord befinden sich integrierte Einrichtungen für Taucher und Forscher. Es werden drei bis vier Expeditionscharter-Trips pro Jahr durchgeführt. Genug Bunkerkapazität für Proviant und Ausrüstung schaffen einen großen Anreiz. Das 43 m lange Schiff mit einem Tiefgang von 3 m soll über 24 Kojen verfügen. Es nimmt acht bis elf Crewmitglieder und acht Passagiere mit. 2016 ist es mit einem zweiten Mast ausgestattet worden.

Als eine Aussage war zu lesen, dass der Diesel in den Tanks der *Kwai* häufig an Land gepumpt wird, um dort die Generatoren zu versorgen. Somit dient auch Diesel als Ware. Viele Inseln werden auch heute noch unregelmäßig versorgt.

Ozeanien besteht aus 25.000 Inseln, die über drei Millionen Quadratmeilen im Pazifik verstreut liegen und auf denen etwa 10 Mio. Menschen leben. Hier findet der meiste Seetransport an Personen, Gütern und Ressourcen statt. Jedoch arbeiten die meisten maritimen Transportunternehmen zunehmend unwirtschaftlich, denn die Schiffe sind mittlerweile alt, schlecht gewartet und ineffizient. Die zunehmenden Brennstoffkosten und kleine Ladungsmengen über große Distanzen machen viele Routen zunehmend unökonomisch. 75-90 % des Dieserverbrauchs gehen auf den Transportsektor zurück. Um einen nachhaltigeren Transport zu fördern, wurde 2013 das Oceania Centre for Sustainable Transport gegründet (Newell, 2020).

Mit der Ausstattung der *Kwai* und der *Na Mataisau* mit Segeln wurde ein erster Schritt in Richtung umweltfreundlichen und nachhaltigen Seetransport getan.

Indosail

Besonderes Augenmerk verdient das Projekt Indosail, welches sich durch die gewählte Größe, die Realisierung eines Prototypen (seit 28 Jahren in Fahrt) und einen vergleichbaren Einsatzzweck auszeichnet.

Die Segel mit einer hoch angebrachten Gaffel in Abbildung 1.7 wurden von Peter Schenzle in den 80er Jahren an der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt ent-



Abbildung 1.7.: Die *Maruta Jaya 900* mit dem Indosail-Rigg



Abbildung 1.8.: Die sich aktuell im Bau befindliche *Ceiba*

worfen. Die *Maruta Jaya 900* ist seit 1993 zwischen den Inseln Indonesiens unterwegs und transportiert Dünger von einer Fabrik in Bontang, Holz, Zement und Ölfrüchte. Sie hat drei Masten mit 1050 m^2 Segelfläche und Elektrowinden an den Segeln. Ein Segel soll von einer Person bedient werden können. Das Schiff hat eine Länge von 63 m, einen Tiefgang von 4,70 m und 900 t Zuladung. Die Crew besteht aus 16 Leuten. Mit 140 PS ist sie nur schwach motorisiert.

2002 gab es den Entwurf des Kreuzfahrtschiffes *Indiga* mit vier Masten und Indosails (www.indiga.de).

Ceiba

In Costa Rica wird die *Ceiba* von der Sailcargo Inc. gebaut. Kiellegung war im Januar 2019. Gebaut wird der Dreimaster in Abbildung 1.8 aus Holz. Im Gegenzug wird wieder aufgeforstet. Die *Ceiba* wird eine Wasserlinienlänge von 32,30 m und eine Breite von 8 m bei einem Tiefgang von 4,30 m haben. Sie soll 200-250 t nachhaltig und ethisch vertretbar produzierte Ware sowie zwölf Passagiere neben der zwölfköpfigen Crew entlang der Pazifikküste von Amerika transportieren können. Sie soll mit einem Elektromotor und Lithium-Ionen-Batterien ausgestattet werden.

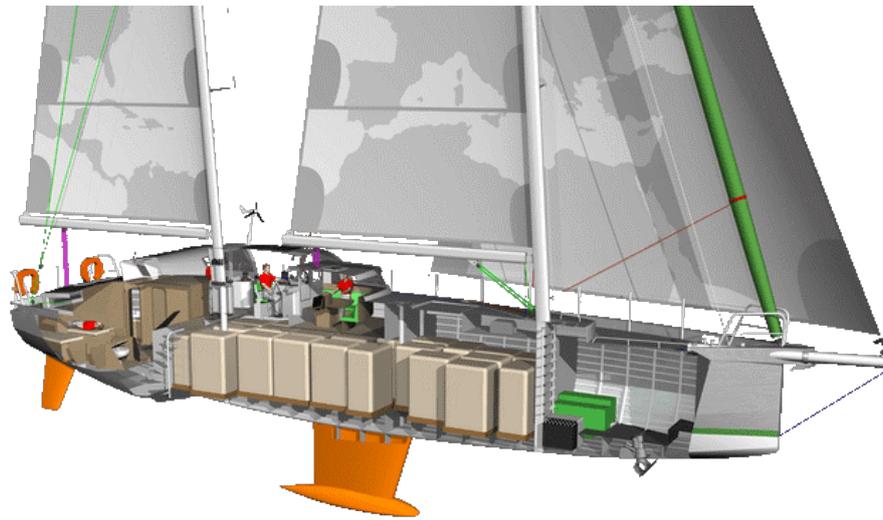


Abbildung 1.9.: Schokoladensegler *Votaan* (Kunst, 2019)

Votaan

In Frankreich haben die Chocolatiers von Grain de Sail beschlossen, ihre Rohwaren mit ihrem eigenen Schiff aus der Karibik transportieren zu wollen. Auf der Hinfahrt sollen Schokolade und Kaffee oder Wein z.B. nach New York exportiert werden. Die Baukosten in Höhe von 1,5 Mio. Euro wurden durch Crowdfunding und Sponsoren aufgebracht. Die 22 m-Ketsch aus Aluminium in Abbildung 1.9 mit einer Kapazität von 35 t soll Ende 2019 ihren Stapellauf gehabt haben (Kunst, 2019). Für September 2020 wurde die erste transatlantische Überquerung geplant (graindesail.com).

Lo Entropy

Im Dual ports-Projekt des Interreg-Programms North Sea Region (2014-2020) sollte die *Lo Entropy* beweisen, dass ihr Geschäftsplan tatsächlich funktioniert und es möglich ist, bis zu 50 t Fracht und zwölf Passagiere kostendeckend und im Wettbewerb zur Straße und RoRo-Fähren unter Segeln transportieren zu können. Sie soll regelmäßig im Englischen Kanal zwischen Ramsgate und Oostende verkehren und wird von Celtic Cruises betrieben werden. Sie hat eine Gesamtlänge von 23,90 m. Derzeit werden Gelder gesammelt, um sie wie in Abbildung 1.10 gezeigt auf eine Wasserstoff-basierte Energieversorgung umzustellen. Die benötigte Energie soll dabei durch den sich im Segelbetrieb mitdrehenden Propeller, Windräder, eine Solaranlage sowie ein System, das die Wellenbewegung nutzt, erzeugt werden. Mit der gewonnenen Energie wird Wasserstoff hergestellt, der gespeichert werden kann, bis er in einer Brennstoffzelle wieder zu Energie umgewandelt wird, um den Motor anzutreiben (Celtic Cruises, 2020).

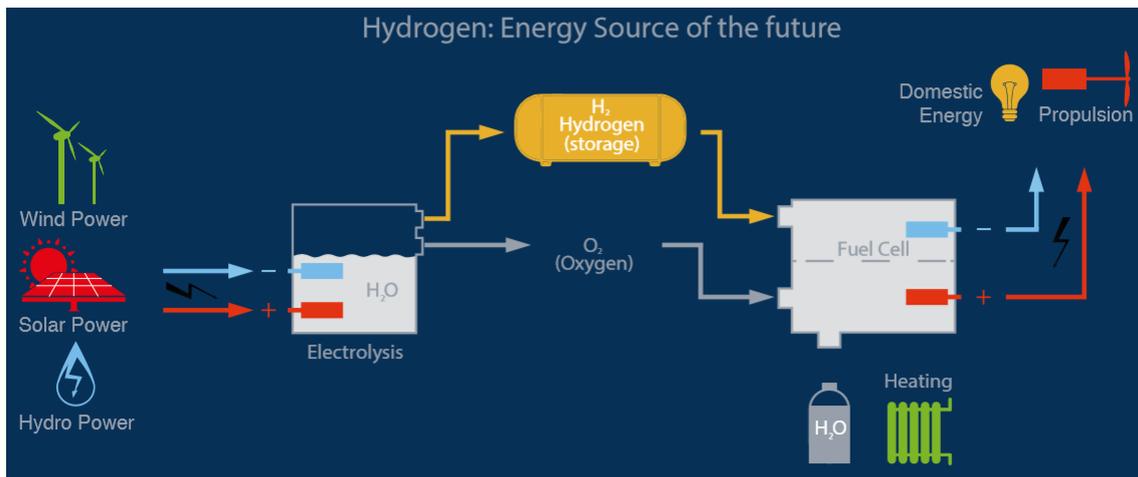


Abbildung 1.10.: Schema zur Wasserstoffnutzung (Celtic Cruises, 2020)

Undine

Die *Undine* verkehrte hauptsächlich von 2013 bis 2015 auf der Linie Hamburg-Sylt, obgleich auch andere Routen nach Frachtaufkommen angeboten werden sollten. Der Umschlag erfolgte überwiegend per Hand.

Aktuell ist dieses Schiff nicht mehr in Fahrt und nach der Übernahme in einen Museumshafen ist ein erneuter kommerzieller Betrieb im Frachtverkehr nicht zu erwarten. Dennoch können aus der Geschichte des jüngsten Frachtbetriebs einige Faktoren übernommen werden. So waren die acht Plätze für Passagiere lange im Voraus ausgebucht (Stanek, 2022).

Die Insolvenz kam durch eine Verkettung mehrerer Umstände wie ausstehende Sozialversicherungsbeiträge und ein Havarieschaden (Reimer Rechtsanwälte, 2020). Laut Berichterstattung ging es dem damaligen Eigentümer - so die Aussage während der Insolvenz - vor allem um mediale Werbung für ein größeres Transatlantik-Projekt.

1.1.4. Passagierschiffahrt

Neben der segelnden Frachtschiffahrt, die eigentlich auch immer nebenher noch Passagiere mitnimmt, gibt es auch einige Segelschiffe für den reinen Passagiertransport. Ein Liniendienst ist hier jedoch noch eher ungewöhnlich. Fair Ferry bietet seit 2019 mit den Zwei- und Dreimastern *Jantje*, *Artemis* und *Twister* einen Liniendienst zum alternativen Reisen auf den Routen Rotterdam - London, Stralsund - Malmö - Kopenhagen, Kiel - Stralsund und in Zukunft auch Rotterdam - New York an.

VoyageVert hat eine moderne 100 m lange Segelfähre, einen Trimaran, entworfen, die 200 Passagiere bei 20 kn befördern soll. Die Vision ist auch hier, eine Flotte an Schiffen über die ganze Welt segeln zu lassen, um so die Art zu reisen in Zukunft zu verändern. Außerdem ist eine Online-Suchmaschine geplant, um alle Angebote des umweltfreundlichen Reisens zu bündeln.

1.1.5. Windzusatzantriebe

Um Brennstoff und CO₂ einsparen und die Umweltvorschriften der International Maritime Organization (IMO) erfüllen zu können, werden u.a. Windzusatzantriebe (WZA) für große Frachtschiffe entwickelt, die einen Beitrag zur Propulsion des Schiffes leisten können. Dabei gibt es die folgenden Kategorien (Strasser, 2020):

Flettner-Rotor

Flettner-Rotoren nutzen den Wind, um zusätzlichen Schub für den Schiffsantrieb zu erzeugen: Ein Flettner-Rotor ist ein hoher Zylinder, der senkrecht auf einem Schiff montiert ist, und sich um seine eigene Achse dreht. Er wird dabei von einem Elektromotor angetrieben. Die optimale Drehzahl hängt von der Windgeschwindigkeit und -Richtung, sowie von der Rotor-Größe ab. Die Wechselwirkung zwischen der drehenden Rotoroberfläche und Windströmung erzeugt eine resultierende Kraft (Magnus-Effekt), die ähnlich zu einem traditionellen Tuchsegel das Schiff mit zusätzlichem Schub versorgt. Durch die aktive Rotation des Flettner-Rotors kann die resultierende Kraft gegenüber einem Tuchsegel von gleicher Größe deutlich erhöht werden. Die Flettner-Rotoren können somit kompakter gestaltet werden, was die Integration in das Decks-Layout eines Schiffes erleichtert. Der Betrieb erfolgt zudem vollautomatisch. Die gyroskopischen Effekte können zudem die Schiffsbewegungen im Seegang reduzieren.

Suction Wing

Das Suction Wing besteht aus einem dicken Flügelprofil und einer Stauklappe. An der Unterdruckseite am hinteren Ende des Profils wird die Grenzschicht abgesaugt (Boundary Layer Suction), sodass die Strömung länger am Profil anliegt und somit eine höhere Auftriebskraft erzeugt wird. Somit kann der Suction Wing bei gleicher Schubleistung kleiner gebaut werden als ein vergleichbares Tuchsegel. Das erleichtert die Integration in das Deckslayout, sodass Neubauten und auch Nachrüstungen vereinfacht werden. Das Absaugen der Grenzschicht geschieht durch im Inneren des Flügels eingebaute Ventilatoren. Die Steuerung des Anstellwinkels sowie der Saugleistung kann automatisch in Abhängigkeit von Windrichtung und -Stärke erfolgen,

sodass keine zusätzliche Crew benötigt wird. Der Suction Wing wird auch unter dem Namen Ventifoil vertrieben.

Wing Sail

Ein Tragflächen-Segel ist ähnlich einem Flugzeugflügel, der vertikal auf einem Schiff installiert wird und wie bei einem Tuchsegel durch Über- und Unterdruck eine Auftriebskraft erzeugt, die für den Vortrieb des Schiffes genutzt werden kann. Ein fester Flügel kann dabei höhere Auftriebskräfte erzeugen als ein Tuchsegel vergleichbarer Größe. Die Ausrichtung und der Trimm des Flügels kann zudem vollautomatisiert gestaltet werden. Durch den höheren Auftrieb kann ein fester Flügel kleiner gebaut werden, die Fläche kann jedoch bei schlechtem Wetter nur aufwändig reduziert werden. Stattdessen können feste Flügel wie eine Windfahne in den Wind gestellt werden, um die entwickelte Kraft bis auf null zu reduzieren. Neue Systeme lassen sich sogar zusammenfallen.

Dyna-Rigg

Das Dyna-Rigg ist eine aerodynamisch optimierte Weiterentwicklung eines klassischen Rah-Segels. Das System besteht aus freistehenden Masten aus Karbon und Segeln, die zwischen den Rahen seitlich ausgefahren werden. Der fehlende Spalt zwischen den einzelnen Segeln erhöht die Effizienz und vergrößert den Einsatzbereich (Windeinfallswinkel). Der gesamte Mast wird gedreht, um den Segelanstellwinkel zu verändern. Die Segel können in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und -Richtung automatisiert gesetzt, ausgerichtet und geborgen werden.

Zugdrachen

Zugdrachen werden am Bug des Schiffes befestigt und unterstützen den Schiffsantrieb durch eine Zuggleine, über die der Drachen mit dem Schiff verbunden ist. Zugdrachen erzeugen pro Quadratmeter Segelfläche größere Vortriebskräfte als herkömmliche Segelantriebe. Dafür gibt es zwei Gründe: Zugdrachen werden aktiv geflogen, das heißt, durch eine automatische Steuerung wird der Drachen in einer Acht-Form geflogen. Die Geschwindigkeit des Drachens in dieser Flugformation erhöht die vorhandene Windgeschwindigkeit, was die sich am Drachen entwickelnden Kräfte deutlich vergrößert. Des Weiteren wird der Drachen in 100 bis 300 m Höhe über dem Schiff geflogen, wo die vorhandenen Windgeschwindigkeiten größer und stabiler sind als über der Meeresoberfläche. Zugdrachen können gut nachgerüstet werden, da sie nur einen geringen Platzbedarf haben. Die Komponenten müssen im Vorschiffsbereich installiert werden. Eine ausführliche Beschreibung zur genauen Funktionsweise eines Zugdrachen ist in Ebeling (2006) zu finden. Probleme bereiten

noch die volle Automatisierung, Absturzrisiken und Flugrichtlinien im Küstenmeer.

Eine Übersicht der Systeme ist in Abbildung 1.11 gegeben.

1.1.6. Schiffe mit Flettner-Rotoren

Prinzipiell kann der GreenSailer mit jedem der genannten WZAs ausgestattet werden. Da der Entwurf des GreenSailers jedoch nur für einen Betrieb mit Hochsegeln oder Flettner-Rotoren durchgerechnet worden ist, werden im Folgenden aus den oben beschriebenen verschiedenen WZAs nur die in letzter Zeit realisierten Projekte mit Flettner-Rotoren genannt. Derzeitige Hersteller sind Norsepower, EcoFlettner und Anemoi.

Realisierte Projekte

E-Ship 1 von Enercon, 2010, Projektladung, vier Flettner-Rotoren 25 x 4 m

MS Estraden, 2014, Ro-Ro-Fähre, 163 m lang, zwei Flettner-Rotoren 18 x 3 m

Viking Grace, 2018, Fähre, ein Flettner-Rotor 24 x 4 m.

Maersk Pelican, 2018, Produktentanker, zwei Flettner-Rotoren 30 x 5 m

Fehn Pollux, 2018, Mehrzwecktrockenfrachter, ein Flettner-Rotor 18 x 3 m

MV Afros, 2018, Bulk Carrier, vier Flettner-Rotoren 16 x 2 m. Die Rotoren können ihre Position auf Schienen an Deck verändern und umgelegt werden.

Copenhagen, 2019, Fähre, ein Flettner-Rotor 30 x 5 m

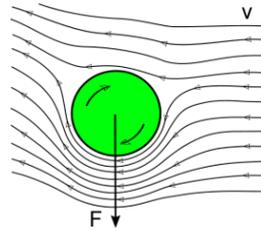
Annika Braren, 2021, Mehrzweckfrachter, ein Flettner-Rotor 18 x 3 m

SC Connector, 2021, Ro-Ro-Fähre, zwei Flettner-Rotoren 35 x 5 m

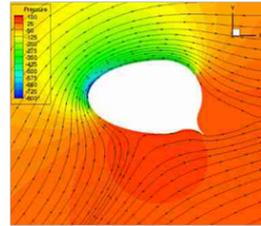
Sea Zhoushan, 2021, Bulk Carrier, fünf Flettner-Rotoren 24 x 4 m

Entwürfe

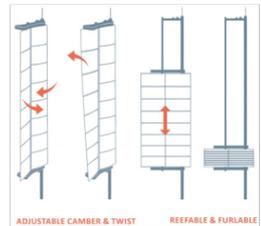
Wind Hybrid Coaster, 2015, zwei Flettner-Rotoren, entworfen im Projekt MariTIM



Flettner-Rotor:
Durch Umströmung eines rotierenden Zylinders entstehen Unterdruck und Überdruck, die das Schiff vorwärts schieben.



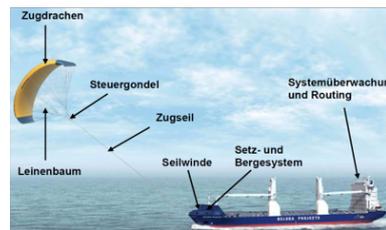
Suction wing:
Gegenüber von der Klappe wird Luft angesaugt, wodurch die Strömung an der Saugseite länger anliegt und höheren Vortrieb erzeugt.



Wing sail:
Fester Tragflügel in unterschiedlichen Designs: mit Klappen, Solarpanelen oder ausfahrbar.



Dyna-Rigg:
Seitlich ausfahrbare Segel an Karbon-Masten. Der Gesamte Mast wird gedreht, um den Segelanstellwinkel zu verändern. Der fehlende Spalt zwischen den einzelnen Segeln verdoppelt die Effizienz.



Zugdrache:
In 300 m Höhe fliegt der Drache eine Acht, um höhere Geschwindigkeiten und Zugkräfte zu erreichen. Besonders bei Wind von hinten gut einsetzbar.

Abbildung 1.11.: Übersicht über derzeitige Windzusatzantriebe. Quellen von oben nach unten: Germann (2906), ACADEMIC (2020), Econowind (2020), van der Bles u. Nieuwenhuis (2019), VPLP Design (2020), Jachtbouw Actueel (1110), Picuki (2020), ShipTechnology (2021), Ebeling (2006)

DeltaChallenger, 2015, sechs Flettner-Rotoren, entworfen von Deltamarin

Very Large Crude Carrier (VLCC), 2019, sechs Flettner-Rotoren, entworfen von Shanghai Waigaoqiao Ship Building Co., Ltd

Die niederländische Reederei Switjnk Shipping bewarb sich 2018 gemeinsam mit den Partnern C-Job Naval Architects und Norsepower für private sowie öffentliche Mittel für eine Finanzierung eines ganzheitlichen Frachtschiffdesigns mit zwei Flettner-Rotoren.

Produktentanker von Stena Bulk, 2020, zwei klappbare Flettner-Rotoren mit Solarpanelen, Konzeptstudie

Futureship's Zero-Emission Ferry Concept: Scandlines-Fähre für Passagiere und Fahrzeuge mit vier sehr niedrigen Flettner-Rotoren, Wasserstofftanks und Brennstoffzellen, Konzeptstudie

1.2. Marktanalyse

“Um bestehende Warenströme und Routen zu analysieren, wurde Kontakt zu 25 deutschen Häfen aufgenommen. Zudem wurde das Statistische Bundesamt kontaktiert. Bei der Analyse und Datenerhebung bestehender Warenströme waren die angeschriebenen Häfen nur bedingt kooperationsbereit und konnten keine oder kaum verwertbare Informationen bereitstellen. Alle im Folgenden aufgeführten Daten beruhen auf Angaben des Statistischen Bundesamtes. Dabei wurde ersichtlich, dass Deutschland in erster Linie Export und Import über seine Seehäfen abwickelt. Der innerdeutsche Transport von Waren über den Seeweg stellt nur eine geringe Masse im gesamten Frachtverkehr dar. Im Jahr 2019 betrug der Gesamtumschlag deutscher Seehäfen 279.968.135 TEU, wovon [nur] 7.585.878 TEU innerhalb deutscher Grenzen umgeschlagen wurde[n]. 39 % dieser Masse wurde auf Schiffen unter deutscher Flagge transportiert” (Lorberg, 2021).

“Die Bedarfe der Inseln nach gekühlten Frischeprodukten und Fairtrade- oder Bio-Produkten konnte nicht direkt erfasst werden, da die befragten Reedereien in der Regel nur verschlossene Lastkraftwagen oder Container transportieren, ohne im Detail zu wissen, welche Waren sich darin befinden” (Lorberg, 2021).

Die Auslegung des Frachtraums erfolgte somit ohne Kenntnis der möglichen zu transportierenden Ladung. Einzige Vorgabe war die Fähigkeit stauen zu können.

1.3. Routenanalyse

Von mehreren Inselversorgern sind über AIS-Daten bzw. GPS-Tracks die Geschwindigkeitsverteilung und die Kursrichtungen analysiert worden, um den GreenSailer beispielhaft auf diesen Routen simulieren zu können, und um einen Vergleich bezüglich Transportleistung und Zeit ziehen zu können. In Abbildung 1.12 ist ein Fahrprofil eines Versorgungsschiffes von Cuxhaven nach Helgoland dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Momentaufnahme. Abhängig von äußeren Umwelteinflüssen wie Wetter, Tide und betrieblichen Parametern fallen die Schiffsgeschwindigkeit und die Reisedauer unterschiedlich aus.

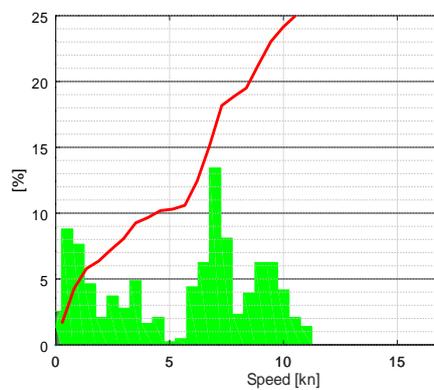
Mit der in AP 2 ermittelten Widerstandskurve des GreenSailers und der in AP 4 erarbeiteten Segelvortriebsleistung konnte eine Fahrt eines Inselversorgungsschiffes von Cuxhaven nach Helgoland simuliert werden. Dazu wurden die übermittelten Schiffspeditionen und Windangaben des Referenzschiffes genutzt. Abbildung 1.13 zeigt, dass bei einer Nutzung des Greensailers z. B. in der Nordsee sehr ähnliche Geschwindigkeiten wie bei bereits vorhandenen Motorschiffen erzielt werden können und die Fahrtzeit ähnlich ist. In diesem Beispiel herrschte Ostwind der Stärke 10-13 kn. Auf der Rückfahrt lag die Anströmrichtung des scheinbaren Windes bei $15,5^\circ$ - 29° . Rein rechnerisch war die Ermittlung der Vortriebskraft der Segel unter diesen Winkeln möglich, in der Realität wird man aber nicht so hart am Wind fahren können, sondern wird etwas kreuzen müssen. Unter diesen Umständen bräuchte das Segelschiff mehr als acht Stunden zurück.

Es lässt sich also feststellen, dass sich bei den betrachteten Umläufen grundsätzlich die gleiche Transportkapazität mit einem durch Windkraft angetriebenen Schiff wie mit einem motorbetriebenen Schiff realisieren ließe. Damit erscheint der Einsatz von Windantrieben grundsätzlich möglich.

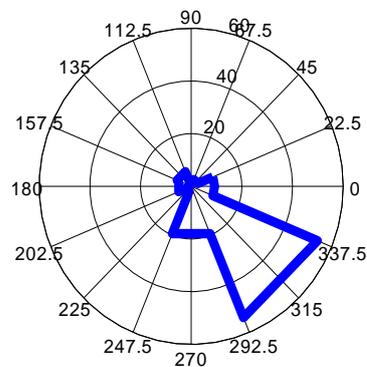
Yoyage profile - Case S02 Y02

Ship main data		Yoyage key figures	
Name:	Ship 2	Port	Cuxhaven - Helgoland
Length:	43,66 m	Yoyage time:	5:38
Breadth:	8,54 m	Transit time	4:52
Draft:	2,85 / 2,75 m	Manovering	0.00
Year Built:	1955	Speed aver.	6.6 kn
Speed:	kn	Speed Transit	7.3 kn
Power:	225kW	Distance (sufficient, water AIS)	36.9nm
IMO:	536 76 85	Distance (total GPS)	37.7nm
Deadweight:	430	<small>Distances to be checked!</small>	
GT:	328		

Geschwindigkeitsverteilung



Kursprofil



Kurs- und Geschwindigkeitsverlauf

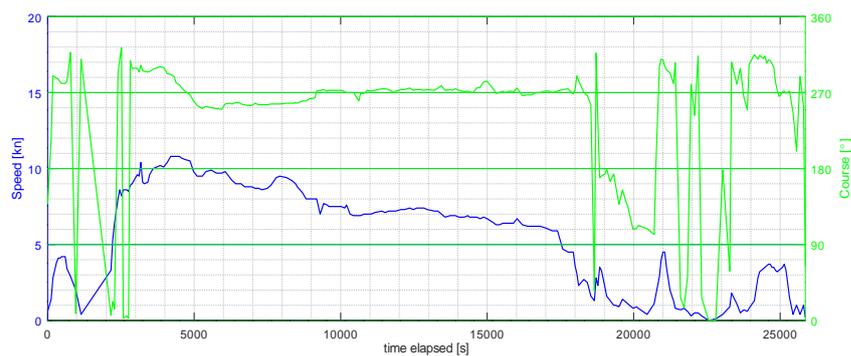


Abbildung 1.12.: Reales Fahrprofil eines existierenden Inselversorgermotorschiffes von Cuxhaven nach Helgoland

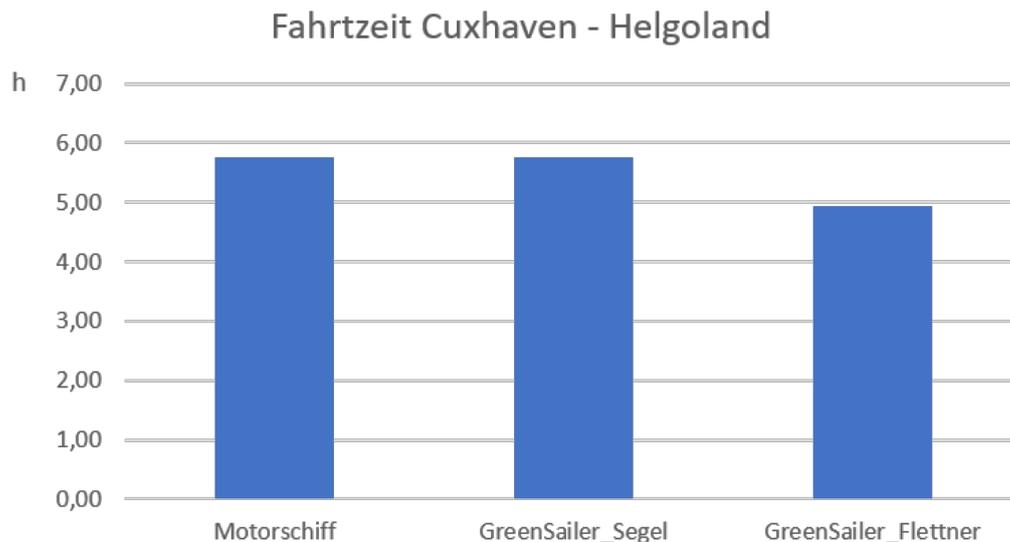


Abbildung 1.13.: Fahrtzeit des GreenSailers unter Segeln oder mit zwei 24 m hohen Flettner-Rotoren im Vergleich zu einem Motorschiff von Cuxhaven nach Helgoland

1.4. Missionsprofil

Während bei den Reedereien, die schon immer im globalen Wettbewerb standen, die Steigerung der Effizienz ein herausragendes Thema ist, so sind jetzt die Aspekte Klimaschutz und Schonung der Ressourcen zu einem breiten öffentlichen Thema geworden.

Damit steigt die Nachfrage von Firmen, Unternehmen und Privatpersonen, die ihre Waren über „grünere“ Transportketten beziehen wollen. Weiterhin ist zu beobachten, dass eine größere Bereitschaft zur Nutzung alternativer und klimafreundlicher Reisemöglichkeiten besteht. Im Projekt „GreenSailer“ wurden hierzu Lösungen analysiert und entworfen.

Obwohl der Transport per Schiff mit Abstand den geringsten Primärenergiebedarf pro Gewicht und Strecke aufweist, sind die gesamten Emissionen aus dem Betrieb signifikant und Einsparungen bleiben weit hinter den technischen Möglichkeiten zurück. Einen der dominierenden Kostenfaktoren im Schiffsbetrieb stellen die Brennstoffkosten dar, deren Verringerung im ureigensten Interesse aller Reeder ist. Vor dem Hintergrund verschärfender Emissionsvorschriften besteht die dringende Notwendigkeit nach zusätzlichen Einsparungen und alternativen Antriebskonzepten.

Die Weltschiffahrtsorganisation (IMO) hat eine Strategie erarbeitet, um den ansteigenden CO₂-Ausstoß der Welthandelsflotte möglichst schnell zu reduzieren und

bis zum Jahre 2050 um mindestens 50 Prozent zu senken. Darüber hinaus wird die vollständige Dekarbonisierung so früh wie möglich in diesem Jahrhundert angestrebt.

Aus ökonomischen wie ökologischen Gründen besteht daher der Bedarf an innovativen und wettbewerbsfähigen Schiffs- und Betriebskonzepten. Gleichzeitig bietet der Seeverkehr die Chance, neuartige Antriebe und Speicherlösungen unter herausfordernden Bedingungen, aber günstigen Voraussetzungen zu testen. Der geringe Energiebedarf für den Vortrieb, größere Toleranz gegenüber zusätzlichem Gewicht (z.B. durch Speicherlösungen für elektrische Energie), die Chance zur Gewinnung von Energie während der Fahrt sowie die Integration verschiedener Konzepte auf einer Plattform erlauben es, die Idee eines realen „Zero-Emission-Transportes“ auf dem Wasser Wirklichkeit werden zu lassen. Die so gewonnenen Lösungen ließen sich dann auf andere Bereiche und Transportwege übertragen.

In dem Projekt GreenSailer sollte der Prototyp eines innovativen Frachtseglers für die Küstenschiffahrt und zur Versorgung von Inseln entwickelt werden, der das Leitbild des “Zero Emission Ship” weitestgehend erfüllen kann. Dabei ging es nicht nur um die Entwicklung eines wettbewerbsfähigen segelnden Schiffes, sondern um die Entwicklung einer Technologieplattform für hybride Antriebskonzepte, effizienteren Schiffsbetrieb und multifunktionale Nutzung. Dies wurde im Entwurf durch die Schaffung eines Gesamtkonzepts und durch das Zusammenwirken der einzelnen innovativen Systeme und deren Abstimmung aufeinander erreicht.

Für ein breites Nutzungspotenzial des zu entwickelnden Schiffes sollten bei der Erstellung des Schiffsentwurfs und Betriebskonzeptes die folgenden Zielsetzungen mit einbezogen werden:

- Transport von Ladung
- Beförderung von Passagieren
- Ausbildungsschiff für nautische und technische Nachwuchskräfte
- Forschungslabor für maritime und meereswissenschaftliche Untersuchungen

Die Machbarkeits- und Entwicklungsstudie soll als Ergebnis einen Schiffsentwurf mit möglichst weitgehenden Spezifikationen des Schiffes und seiner Einrichtungen enthalten. In AP8 wird eine Wirtschaftlichkeitsprüfung zeigen, welche der vier betrachteten Nutzungsarten die sinnvollste und vorrangig zu verfolgende sein könnte.

1.5. Spezifikation

Basierend auf den vorangegangenen Analysen, den internen Gesprächen sowie den Diskussionen im Projektbegleitenden Ausschuss wurde für den GreenSailer die folgende

Spezifikation erstellt. Anhand dieser Vorgaben richteten sich die einzelnen Arbeitspakete aus.

1.5.1. Schiffstyp

Bei dem zu entwerfenden Schiff handelt es sich um ein hauptsächlich durch Wind angetriebenes Mehrzweckschiff. Es soll dabei vier verschiedene Nutzungsszenarien erfüllen:

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Hintergründe
Ladungstransport	s. Payload	
Passagiertransport	max. 12	Eignung und Auswirkung der Einstufung als Special Purpose Ship oder Passagierschiff zu klären. Feedback aus dem PBA: es bei 12 zu belassen.
Ausbildungsschiff		ggf. höherer Besatzungsanteil, Möglichkeiten zum Training
Forschungsschiff		Nutzung innerhalb der Reichweite, Loggen von während der Fahrt erfassten Daten oder reine Forschungsmission. Ermittlung von Daten, die für den Windantrieb und dessen Weiterentwicklung wünschenswert sind.

1.5.2. Klassennotation und Vorschriften

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Datum Kiellegung	1.1.2018	neue Vorschriften als Stand der Technik prüfen
Intakstabilität	ISC 2008	
Leckstabilität	SOLAS 2009 B1	
Klassevorschrift	DNVGL100 A5	
Umweltvorschriften		soweit existent berücksichtigen bzw. nachweisen
NOx, SOx	IMO 2010, Tier III	zu minimieren
Brennstofftanks	MARPOL 73/78, Annex I Reg 12A	

Als Grundlage sollen aufgrund der vorhandenen Erfahrungen und Werkzeuge die aktuellen Bauvorschriften des DNVGL zugrunde gelegt werden. Sofern sich Angaben im Verlauf nur bei anderen Klassifikationsgesellschaften finden lassen, sollen diese als äquivalent ebenfalls herangezogen werden können.

Folgende Zusatznotationen sollen berücksichtigt bzw. zumindest geprüft werden:

- Battery
- EO
- ECO
- FC
- Gas ready
- Clean
- EC
- Recyclable
- Shore power
- Silent

1.5.3. Einsatzprofil

Als Ausgangsbasis für die Betrachtung von AP8 und für den Entwurf soll berücksichtigt und ggf. später angepasst werden:

- Ladung: 75% der Einsatzzeit, Auslastung t. b. d.
- Passagiere: 90% Auslastung während der Ladungsreisen
- Ausbildung: 5% der Einsatzzeit, ggf. mit Ladung

- Forschung: 20% der Reisezeit als reine Nutzung

Nach einer Diskussion im PBA wird eine Konzentration auf eine Fähigkeit bzw. ein Verzicht auf eine parallele Nutzung empfohlen. Der kommerzielle Ladungstransport steht als Benchmark im Vordergrund.

1.5.4. Hauptdaten

Indikative Hauptabmessungen

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Allgemein		Zu optimieren unter Berücksichtigung von Bau- und Betriebskosten, der geforderten Kapazität und Betriebsanforderungen, sowie Stabilitätskriterien
Länge, über alles	ca. 50-60 m	zu optimieren (Wellenwiderstand)
Länge, zwischen den Loten	-	zu optimieren
Breite		zu optimieren
Tiefgang, max	3,50 m	zu minimieren
Tiefgang, Design	-	zu optimieren
Seitenhöhe	-	nach Vorschrift, grünes Wasser an Deck vermeiden
Gesamthöhe	NOK-gängig	im Ballastfall
Design-Speed	6-10 kn	Widerstandsminimierung im Bereich Bft. 3, reale Routenprofile als Vergleich; 15 % Sea-Margin und 85 % MCR als Ausgangsbasis
Geschwindigkeit, maximal	12 kn	min. 8 kn bei 4 kn Strom und Bft. 3
Deadweight	500 t	bei maximalen Tiefgang, zu optimieren

Reichweiten

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Reichweite, Distanz	1200 sm	keine Windunterstützung, Designgeschwindigkeit
Reichweite, Dauer	14 Tage	
Reichweite, Notbetrieb Fall 1	100 sm / 1 d	bei 5 kn & Bft. 4, SeaState: 3
Reichweite, Notbetrieb Fall 2	200 sm / 2 d	bei 5 kn & Bft. 4, SeaState: 3
Reiseprofil	-	Nach Definition und Aufnahme realer Profile im Projekt festzulegen
Reserve	-	Wird erfüllt durch Notbetrieb-Möglichkeit am letzten Reisetag, nicht extra vorzusehen

Umweltbedingungen

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Allgemein		Entsprechend der Zielvorgaben / Anmerkungen der jeweiligen Anforderungen
Lufttemperatur	nach Klasse	
Seewassertemperatur	nach Klasse	Für Schleppversuche und Propulsionsprognosen 15 °C, Werte nach ITTC
Seewasserdichte	1025 kg/m ³	
Lebensdauer	25 Jahre	für die erste Strukturauslegung
Fahrtgebiet	ohne Restriktion	
Eis	keine	

Besatzung und Passagiere

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Besatzung	3-8	zu minimieren unter Berücksichtigung einer sicheren Schiffsführung (inkl. Fatigue), Unterbringung vorhalten
Passagiere	6-12	zu maximieren

Inneneinrichtung

Kriterium	Zielvorgaben / Anmerkungen
Unterbringung, Besatzung	in Anlehnung an BG Verkehr <ul style="list-style-type: none"> • Kapitän, Einzelkammer • Ingenieur, Einzelkammer • restl. Besatzung in Doppelkabine, WC/Dusche t.b.d.
Unterbringung, Passagiere Öffentliche Räume	einfach und zweckmäßig, max. zwei Pax/Kabine nach Vorschrift in Anlehnung BG Verkehr
Galley / Küche	Gemeinsame Mahlzeit für Besatzung oder Passagiere
Messe	Gemeinsame Mahlzeit für Besatzung oder Passagiere
Mehrzweckraum	Konferenzmöglichkeit (Training, Ausbildung, Forschung) für 20 Personen (ggf. nur im Hafen)
Stores	<ul style="list-style-type: none"> • Proviant, Getränke • Bootsmannstore • 1x EX-Raum

Die Mehrfachnutzung von Räumen ist zulässig. Es soll aber für die Freiwache jeweils eine Rückzugsmöglichkeit zur Erholung geben.

1.5.5. Kapazitäten

Bunker und Stores

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Bunker		Spezifiziert durch Reichweite und Personen an Bord
Stores		Spezifiziert durch Reichweite und Personen an Bord

Es sollen keine Brennstoff-, Schmieröl- oder Altöltanks direkt an der Außenhaut gefahren werden. Dies gilt auch, wenn dies rechtlich zulässig wäre. Sollten sich unzumutbare Einschränkungen ergeben, so ist das Risiko für Ölaustritt nachzuweisen und zu minimieren.

Payload

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Tragfähigkeit	700t / 600m ³	vgl. Deadweight, zu maximieren bzw. zu übertreffen
Container	TEU, FEU	Anzahl geometrisch zu maximieren. 10 Fuß ebenfalls staubar.
IBC-Tanks	-	2t/Stück (VCG 50%)
Big-Packs	-	2t/Stück (VCG 50%)
Euro-Paletten, Gitterboxen	-	2t/Stück, VCG 55% von 970 mm
Gefahrgut	-	Prüfen nach IMDG-Code
Kühlladung	16 m ³	besser 2x 16 m ³ für gekühlt/gefroren, integriert oder als 10-Fuß-Container-Option.
Abrollbehälter	-	Eignung und Verladung prüfen
Absetzcontainer	-	Eignung und Verladung prüfen

Für Container soll angenommen werden:

- je TEU 14t homogen (VCG bei 45% der Containerhöhe), sonst skaliert
- bei mind. einer Lage auch High-Cubes möglich
- die unterste Lage soll jeweils das maximal zulässige Containergewicht tragen können und die Stabilitätsvorschriften erfüllen

Alle Laderäume und deren Luken sind mindestens wetterdicht auszuführen. Es muss loses und kleines Stückgut berücksichtigt werden, sodass entweder stapelbare kleine Ladungsträger / Mini-Container o.a. vorzusehen sind. Bei Laderäumen über 4 m Höhe soll der Einsatz eines Zwischendecks geprüft werden.

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Belastung Decks, allgemein	3.0 kN/m ²	
Belastung Brückendeck	3.5 kN/m ²	
Belastung Decks MR	8.0 kN/m ²	nach Einrichtung
Belastung Laderaum	120 – 150 kN/m ²	
Belastung Hauptdeck / Luken	50 kN/m ²	falls für Ladung vorgesehen, sonst nach Klasse

Ballast

- Soweit erforderlich zur Erfüllung der Vorschriften und Kriterien
- Gesamtwasserballast zu minimieren
- Festballast zu minimieren

Ladefälle

Kriterium	Zielvorgaben / Anmerkungen
Ladefall 1 Design, Abfahrt	<ul style="list-style-type: none">• 100% Payload• 100% Bunker und Stores• 100% Service- und Setztanks• Ballastwasser nach Anforderung, ebener Kiel bzw. Trimm für minimalen Widerstand, keine Krängung
Ladefall 2 Design, Ankunft	<ul style="list-style-type: none">• 100% Payload• 10% Bunker und Stores• 100% Service- und Setztanks• Ballastwasser nach Anforderung, ebener Kiel bzw. Trimm für minimalen Widerstand, Krängung minimal
Ladefall 3 Ballast, Ankunft	<ul style="list-style-type: none">• 0% Payload• 10% Bunker und Stores• 100% Service- und Setztanks• Ballastwasser nach Anforderung, ebener Kiel bzw. Trimm für minimalen Widerstand

Sofern die Ladefälle nicht weiter definiert werden, soll jeweils eine Beladung durch Container oder durch folgende Annahmen gerechnet werden:

- $1,5 \text{ t/m}^3$ homogen pro Laderaum bei ebenem Trimm (oder minimalem Widerstand) bis auf maximalen Tiefgang. (vgl. Flüssigkeiten in Kleinbehältern, Sand als Baustoff)

Bei der Gewichtung von sich widersprechenden Anforderungen bzw. für ein Routenprofil sollen die Ladefälle wie folgt berücksichtigt werden:

- Design, Abfahrt: 40%
- Design, Ankunft: 40%
- Ballast, Ankunft: 20%

Für eine Betrachtung über ein Kalenderjahr soll angenommen werden:

- Betriebstage: 360
- Werfttage: 5
- Hafenziegezeit: Auf Basis eines Routenkonzeptes, Startwert: 20% im Hafen

1.5.6. Forschungsequipment

- Aufnahme und Speichermöglichkeit für Daten während der Fahrt
- Umrüstbar auf Forschungsbetrieb bei Verzicht auf sonstiges Payload
- Heckgalgen optional
- Winde optional, mobil an zwei bis drei Stellen einsetzbar oder fest installiert. SWL 0,9 t.
- Mindestens Platz für drei TEU an Deck als mobiler Laborraum oder äquivalenter Platz an Bord (davon mindestens $\frac{1}{3}$ an Deck mit Zugang auf das Hauptdeck). Gewicht 5-10 t.
- Für den Forschungsbetrieb brauchen keine höheren Gewichte als für den Ladungstransport angesetzt zu werden.
- Aufnahme für ein Beiboot wie für die Payload.

1.5.7. Schiffstechnik

Propulsion

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Vortrieb	-	100 % Motor für Designgeschwindigkeit möglich, Energieverbrauch und Emissionen minimal; Teillast und Segelbetrieb sind zu berücksichtigen
Windantrieb	-	Vortrieb und Einsatzdauer zu optimieren und zu maximieren
Manövrierfähigkeit	-	Minimum-IMO, zu übertreffen
Sonstiges	-	Station-Keeping für Ladungsumschlag auf See ohne Anker zu berücksichtigen

Energie

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Kühl-Container	10 kW/Reefer, Gleichzeitigkeitsfaktor 0,8	Anzahl nach Staumöglichkeit, nicht mehr als 50 % der Ladung
Energiebilanz	-	Zu erstellen und nachzuweisen. 100 % Antrieb und Manöviereinrichtungen plus Bordbetrieb min 0,5 h (danach ohne Hotellast)
Bordbetrieb	-	Nach Klassevorgabe
Notbetrieb	-	Nach Klasse, in Anlehnung aber nicht Erfüllung von SrtP: dauerhaft Klima, Lüftung, Beleuchtung und Geräte in Maschinenraum, Brücke, 1x Aufenthaltsraum, 1x WC, Versorgung mit Essen und Trinken, alle Noteinrichtungen (Feuerlöscheinrichtung, Hospital)
Hotellast	-	Küche, Klima

Generell soll ein möglichst hoher Anteil des Energieverbrauchs ohne Emissionen gedeckt werden. Als Zielgröße soll in einem Szenario mindestens eine kurze Forschungsfahrt gewählt werden, bei der das Schiff nach einer Wartezeit eine kurze Distanz absolvieren kann.

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Zero-Emission (Forschung)	Schiffsbetrieb	Mindestens 1 h Standby + 1 h bei 5 kn Fahrt und 3 Bft Wind ohne Verbrennungsabgase, +12 kW E-Leistung für Forschung

Windantrieb

Kriterium	Anforderung	Zielvorgaben / Anmerkungen
Antriebsleistung	-	Vortrieb für die angesetzte Kurs- und Geschwindigkeitsverteilung zu optimieren
Bedienung	-	Es ist auf eine einfache Bedienung und Wartungsfreundlichkeit zu achten. Es sollen möglichst keine zusätzlichen Besatzungsmitglieder erforderlich sein, wenn doch soll die Einsparung den Personalkosten gegenübergestellt werden.
System	-	Es sind mindestens drei unterschiedliche Windantriebssysteme zu analysieren und zu vergleichen. Der Vergleich umfasst mindestens: Erzielte Vortriebsleistung, Bau- und Unterhaltskosten, Einfluss auf Gewicht / Stabilität
Sicherheit	nach Klasse und Vorschriften	Auslegung der Systeme und des Riggs nach Klassevorschriften oder Nachweisen der Äquivalenz. Nachweis, dass alle auftretenden Umweltbedingungen schadlos überstanden werden können.

Sicherheitsequipment

- Nach Vorschriften
- Bereitschaftsboot (Nutzbar als Tender)
- Rettungswesten, Überlebensanzüge
- Rettungsinseln
- Brandmeldeanlage, Alarmsystem
- Min. je eine Haupt- und Notfeuerlöschpumpe
- Notstrom nach Kriterien und Vorschriften
- Bilgepumpe
- Staumöglichkeit berücksichtigen um Rettungsmittel für 100 Passagiere vorzuhalten

Navigation

- GMDSS compliant (A3)
- ECDIS, Radar (X-Band), GPS, AIS
- Magnetkompass, Sat-Kompass
- VHF, MF/HF, NAVTEX, Wetterfax/Software, INMARSAT-C, Navigations PC
- Echolot, möglichst vorausschauend
- Kartentisch
- Navigationsbeleuchtung
- 1x Suchscheinwerfer, Decksbeleuchtung

Ladungsumschlag

Kriterium	Anforderung
Umschlagseinrichtung	2,5 t SWL, 4 m neben Außenhaut Es soll möglich sein, Objekte von 1 m x 1 m x 1 m und 2 t Gewicht aus dem Laderaum 4 m neben dem Schiff auf Höhe der Wasserlinie bzw. 3 m oberhalb der WL abzusetzen.
Container	- kein Umschlag mit eigenem Equipment. Zugänglichkeit für landbasierte Kräne nachweisen, für typische Containerbrücken zu prüfen. Prüfen, ob Umschlag eines leeren TEU möglich ist.
Flüssige Ladung	- Brennstoffe modular in kleinen Tanks, Abgabe für Frischwasser aus eigenen Tanks/Herstellung berücksichtigen
Hilfsmittel, Stapler	- Decks für Equipment auslegen, sodass die Ladung horizontal bewegt werden kann. Zu berücksichtigen, dass dieses auch landseitig abgegeben werden kann. Sichere und geschützte Stauung an Bord zu ermöglichen.
Ladungssicherung	- Flexible, schnelle und sichere Stauung möglich für die oben definierte Ladung; Lascheinrichtungen vorsehen und einrechnen

- Beleuchtung für Ladungsumschlag (Deck, Kai) für beide Schiffsseiten möglich
- 1x Tenderboot, mit eigenem Equipment ohne Beladung ausbring- und einholbar; min sechs Personen, Mindestens 1x voller IBC-Tank/Big-Pack umschlagbar (Kran an Land)

1.5.8. Referenzen

Im praktischen Werftbetrieb bauen die Spezifikationen auf vorhandenen Projekten oder vergleichbaren Schiffen auf, um das komplexe System Schiff behandeln zu können. Dies wird für den GreenSailer ebenfalls genutzt. Sofern keine weiteren Angaben

oder Spezifikationen vorliegen, soll als Hauptreferenz das Projekt „IndoSail“ herangezogen werden, da es vergleichbare Anforderungen und ähnliche Abmessungen besitzt.

Als Vergleichsschiffe stehen zur Verfügung:

- IndoSail (Maruta Jaya)
- Glacer 222
- Glacer 160
- Glacer 111

AP 2: Schiffsentwurf

2.1. Raumkonzept

Zunächst sind die Schiffsgeometrie und die Raumanordnung vom Glacer-Entwurf in die Schiffbausoftware NAPA übernommen worden. Der Koordinatenursprung wurde ins hintere Lot, also durch den Ruderschaft gelegt. Die positive x-Richtung weist in Schiffsängsrichtung nach vorne. Die positive y-Richtung ist in NAPA nach Backbord definiert. Die positive z-Richtung weist vom Kiel aus nach oben.

Bei der Definition eines ersten Beladungsfalls ist aufgefallen, dass die Beladung des vorderen Laderaums zu einem zu starken Trimm führen würde, welcher durch die vorhandenen Ballastwassertanks nicht ausgeglichen werden könnte. Der vordere Laderaum musste somit nach hinten verlegt werden, wo ein Beladen ohne Vertrimmen möglich ist. Dies führte dazu, dass die dort vorgesehenen Unterkünfte wegfielen. Somit wurde die Personenzahl von anfangs 40 auf 21 reduziert. Ein großer Vorteil ist, dass man damit unter die Regularien eines Frachtschiffes fällt und nicht mehr die verschärften Sicherheitsbestimmungen eines Fahrgastschiffes einzuhalten braucht. Um dennoch ausreichend Räume für die Crew und die Passagiere zur Verfügung zu haben, wurde achtern ein weiteres Deck eingezogen. Abbildung 2.14 zeigt im Generalplan die Anordnung der Räume.

Das Schiff ist in fünf Decks und sieben Sektionen eingeteilt. Durch das gesamte Schiff zieht sich mittig ein 1,20 m hoher Schacht für Kabel und Rohrleitungen. In Sektion 0 im Heck befindet sich zunächst der Raum für die Rudersteuerung, darüber ist Platz für einen kleinen Konferenzraum und darüber an Deck befindet sich die Kombüse. Es folgt das erste Schott.

In Sektion 1 befinden sich der Maschinenraum, darüber auf Deck 1 ein Raum für Batterien. Eventuell können sie im Maschinenraum untergebracht werden, um den Schwerpunkt zu senken. Ferner finden sich auf dem Deck die Belüftungsanlage, ein Fitnessraum, ein Raum zum Wäschewaschen sowie ein großzügiges Labor und ein Raum zum Lagern von Ausrüstung. Auf Deck 2 liegen die Kabinen für die Besatzung und die Passagiere und zwei Räume für Gepäck.

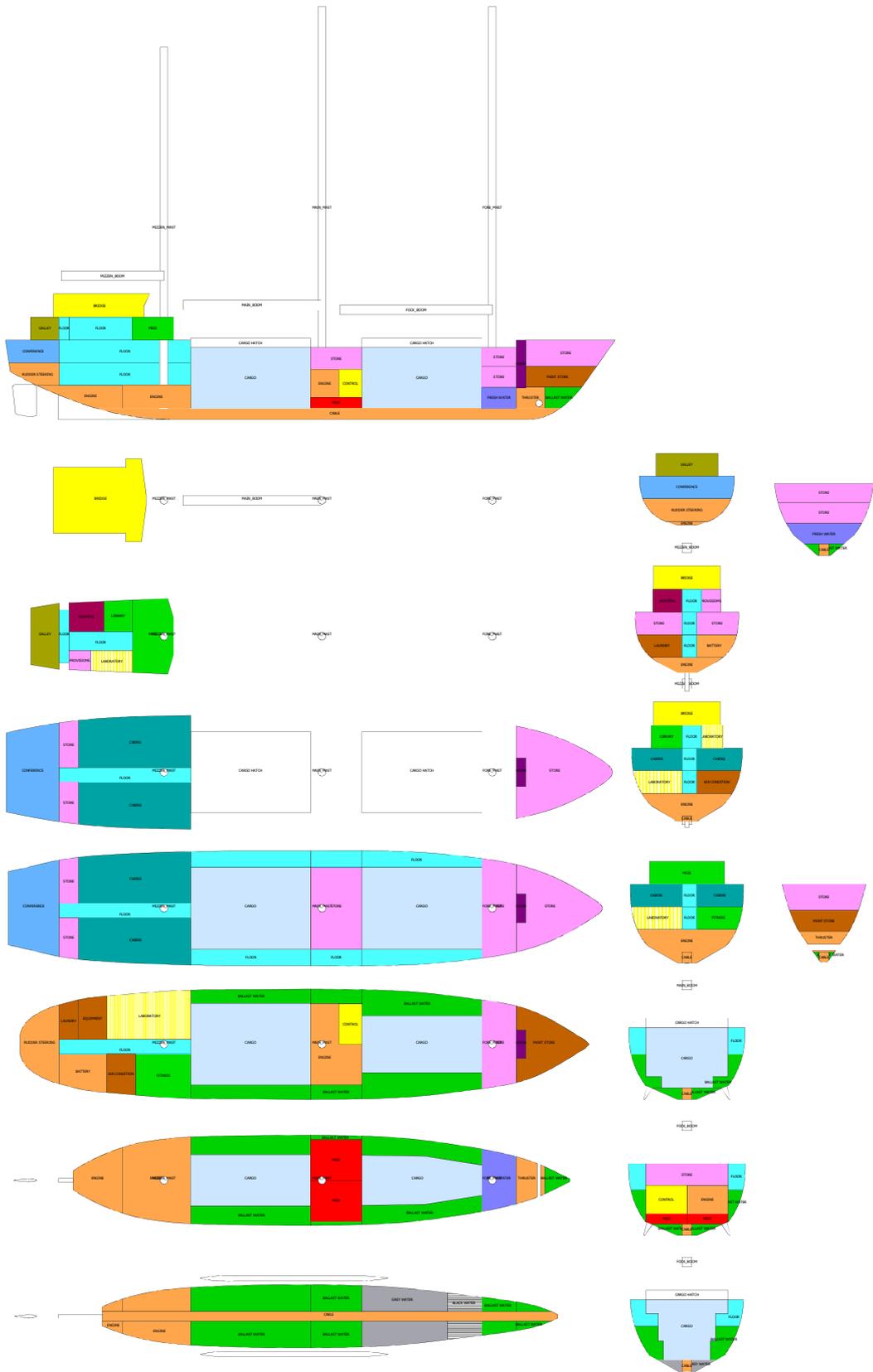


Abbildung 2.14.: Raumübersicht

Nach § 15 Absatz 2 Satz 2 Nummer 1 der See-Unterkunftsverordnung "dürfen Schlafräume, getrennt nach Männern und Frauen, auf Schiffen mit einer Bruttoreaumzahl von weniger als 3 000 und auf Spezialschiffen mit bis zu zwei Besatzungsmitgliedern belegt werden." Nach § 16 Absatz 3 darf deren Bodenfläche nicht geringer als 7 Quadratmeter sein (Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, 2019). Die Bruttoreaumzahl des GreenSailers ist in Kapitel 6.1.2 zu 1313,4 berechnet worden. Auf beiden Seiten des Flurs befinden sich sechs Doppelkabinen mit durchschnittlich 10,5 m² inklusive Nasszelle.

Auf Deck 3, befinden sich auf der Steuerbordseite nahe der Kombüse ein Proviantraum, gefolgt von einem kleinen Labor- oder Arbeitsplatzraum. Die Messe bzw. der Salon füllen das Deck im vorderen Bereich auf der vollen Breite. Auf der Backbordseite befinden sich ein Hospital und eine Bibliothek. Auf Deck 4 liegt die Brücke.

In den Sektionen 2 und 4 befinden sich zwei große rechteckige Laderäume mit ca. 611 und 457 m³ Volumen. Links und rechts davon befinden sich Flügeltanks, die bis zur Außenhaut gehen und durch ein Zwischendeck unterteilt sind. Die unteren werden für Ballastwasser verwendet, die oberen dienen als Gang oder Räume für Sonstiges. Die Sektion dazwischen kann für spezielle Tanks und als Maschinenraum verwendet werden. Wenn beide 200 kW-Generatoren sowie das Blockheizwerk eine Woche ununterbrochen durchlaufen, ergibt sich ein Dieserverbrauch von ca. 14 m³. Im NAPA-Modell sind zwei Tanks zwischen den beiden Laderäumen mit zusammen 50,4 m³ vorgesehen. Auch hier gibt es Flügeltanks mit Ballastwasser, sodass die Dieseltanks nicht direkt an der Schiffsaußenhaut liegen. Darüber liegt ein Maschinenraum, wo z. B. Generatoren und das Blockheizwerk sowie ein Kontrollraum untergebracht werden könnten. Der Raum hat eine definierte Höhe von drei Metern. Darüber befindet sich noch ein frei verfügbarer Raum. Er kann z. B. als Kühlraum für Ladung oder zur Unterbringung von Winden für einen Forschungskran verwendet werden.

Das anfallende Grauwasser bzw. Schwarzwasser wurde nach einem Pro-Kopf-Wasserverbrauch über eine Woche zu 10731 bzw. 4851 l berechnet. Nach der BG Verkehr (2014) berechnen sich das Grauwasser ohne Verwendung einer Vakuumanlage zu 33880 bzw. 49280 l für ein Fahrgastschiff und das Schwarzwasser zu 21560 l. Die Tanks dafür fassen 35,6 bzw. 10,1 m³ und liegen zu unterst in Sektion 4 unter dem Laderaum rechts und links vom Kabelkanal. Die Tanks sind somit zu knapp bemessen, weil zunächst vom Betrieb mit einer Vakuumpumpe ausgegangen worden war. Nach Herrn Heimhold (2020) von Fehn Shipping Management ist eine Vakuumpumpe jedoch zu wartungsintensiv. Um Entsorgungskosten im Hafen zu sparen,

empfiehlt sich der Einbau einer Abwasserbehandlungsanlage, sodass die Tanks kleiner ausfallen könnten.

In Sektion 5 befindet sich ein Ballastwassertank. Der Frischwasserverbrauch wurde für 21 Personen (Crew + Passagiere / Trainees) für sieben Tage nach dem Pro-Kopf-Verbrauch eines Privatpersonenhaushalts zu 11466 l berechnet (Volland, 2013). Eine Auflistung der Verbräuche befindet sich im Anhang A.2.2. Herr Heimhold (2020) gibt erfahrungsgemäß einen Frischwasserverbrauch von einer Tonne pro Tag für ein Frachtschiff mit sieben Personen an Bord an, da das Deck und eventuelle Laborausrüstung regelmäßig mit Wasser gespült werden. Auch die Toiletten sollten mit Frischwasser betrieben werden, um Korrosion zu vermeiden. Das NAPA-Modell berücksichtigt Platz für einen Tank mit 49,2 m³ Fassungsvermögen. Die Räume in den beiden Decks darüber stehen zur freien Verfügung. Im Bugbereich (Sektion 7), hinter dem Kollisionsschott, befindet sich das Bugstrahlruder. Darunter und davor ist weiterer Raum für Ballastwassertanks geplant. Darüber befindet sich ein Farbenlager, was auch kleiner ausfallen könnte, und darüber noch ein nicht weiter spezifizierter Raum.

Es wurde entschieden, den Entwurf so zu gestalten, dass wahlweise ein Segelrigg oder zwei kleine Flettner-Rotoren installiert werden können. Somit ist es möglich in den ersten Lagen beider Laderäume zwei 20-Fuß-Container hintereinander stauen zu können. Insgesamt könnten 17 Container transportiert werden. Werden Flettner-Rotoren als Segelsystem installiert, haben sie zwischen den Endscheiben einen Durchmesser von drei Metern und eine Höhe von 18 Metern. Sie werden zwischen den Schotten 3 und 4 bei 31,80 m vom hinteren Lot (AP) aus bzw. vor Schott 6 bei 54 m vom AP aus installiert. Die Positionen wurden durch eine Momentengleichgewichtsrechnung der auftretenden Kräfte beim Segeln abgesichert. Die Endscheiben haben einen Durchmesser von sechs Metern.

Die beiden Lukendeckel werden als Faltdeckel gefertigt und gehen mit jeweils 12,60 m über die gesamte Länge der Laderäume. Die Laderäume gehen von Schott 2 bis 3 und von Schott 4 bis 5. Werden Flettner-Rotoren an Deck installiert, so kann die untere Endscheibe des hinteren Rotors nur vier Meter im Durchmesser messen, damit die Lukendeckel nicht mit ihr kollidieren. Zum vorderen Lukendeckel ist ein Meter Platz, da der Lukendeckel des vorderen Laderaums zweigeteilt ist und nach achtern aufgeklappt wird. Der vordere Teil kann nicht einfach angehoben werden, da er sonst mit dem Baum kollidieren würde, der aufgrund der Wanten maximal ca. 60° ausgeschwenkt werden kann. Dies trifft nur für die Konfiguration mit Segelrigg zu. Um das höher gelegene Backdeck nicht direkt an den Laderaumdeckel anschließen

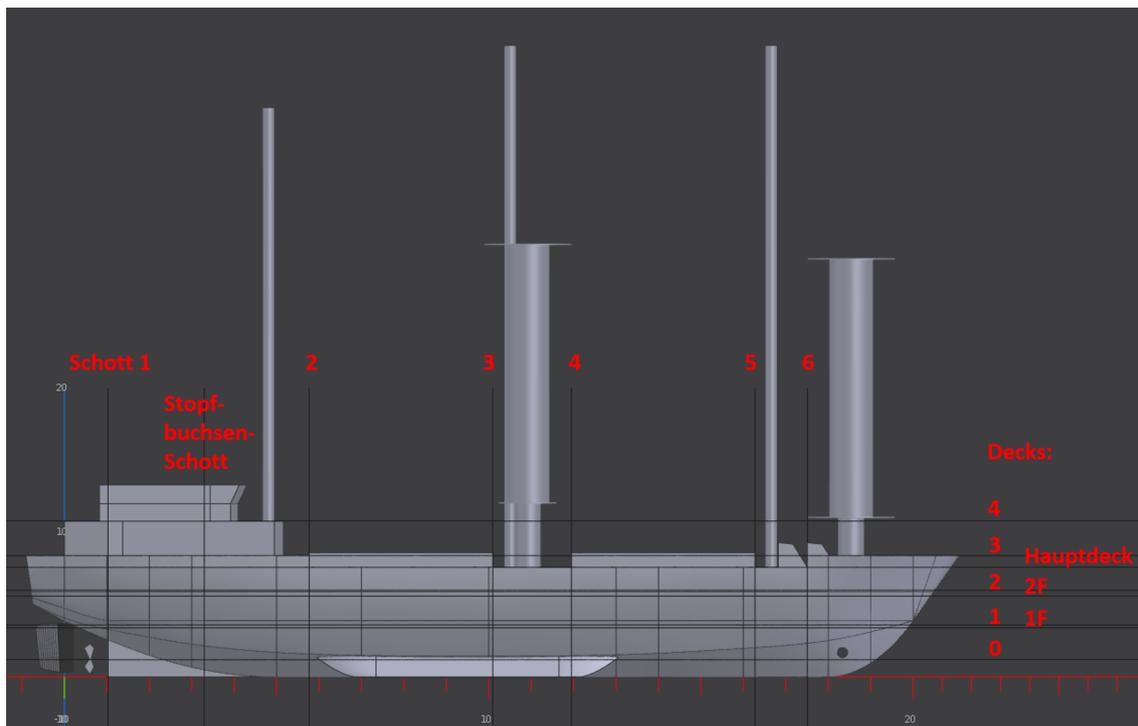


Abbildung 2.15.: Lage der Schotte und Decks sowie der Masten oder Rotoren

zu lassen, wird es erst mit dem Kollisionsschott hochgezogen. Es befinden sich zwei Niedergänge an Deck, um an die jeweiligen Räume vorne zu kommen. Abbildung 2.15 zeigt die Lage der Schotten, Decks und Windzustanztriebe.

2.2. Liniendriss

Der als Zeichnung von Herrn Glacer vorliegende Entwurf des GreenSailers wurde mit NAPA drei-dimensional aufgebaut und digitalisiert. Daraus wurde in Abbildung 2.16 ein Liniendriss abgeleitet. Die Beschriftung enthält links die Hauptabmessungen und rechts weitere Kennwerte. Die obere Grafik zeigt den Spantenriss, die mittlere die Längsschnitte und die untere die Wasserlinien. Jede der drei Kurvenarten ist in allen drei Ansichten enthalten, sodass sich ein Schnittpunkt in allen drei Ansichten wiederfinden lässt.

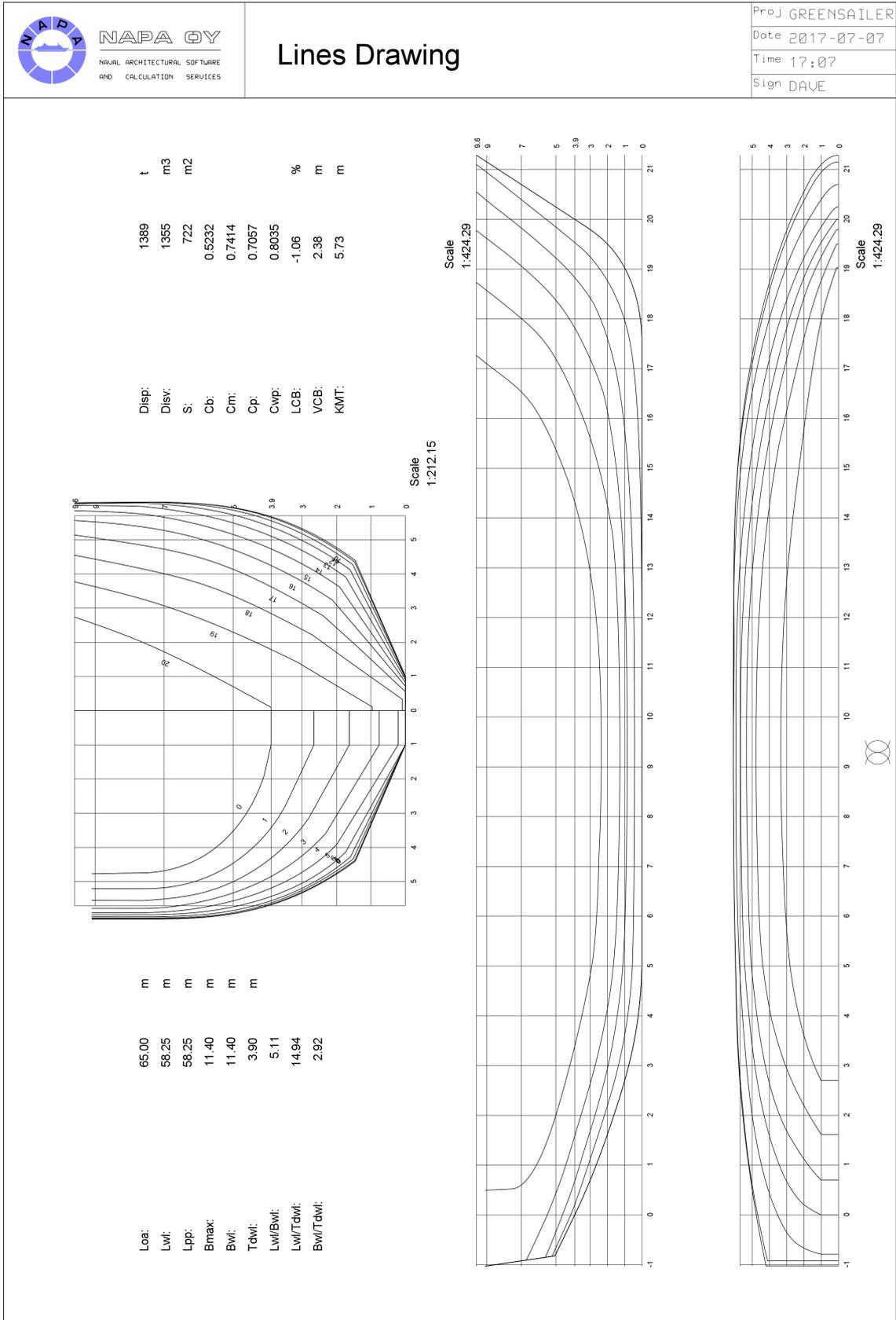


Abbildung 2.16.: Liniendriss nach dem Entwurf von Herrn Glacer

2.3. Schiffswiderstand

Der Widerstand eines Schiffes wird für tiefes und glattes Wasser ohne Einfluss von Wind und Wellen angegeben. Es ist der reine Schleppwiderstand R_T . Zusätzlich können Seegangseigenschaften wie Rollen oder Stampfen und der damit einhergehende erhöhte Widerstand unter Einfluss von unterschiedlichen Wellen aus verschiedenen Richtungen untersucht werden.

2.3.1. Glattwasserwiderstand

Der Schiffswiderstand wurde zunächst im Programm Paramarine mit der Methode von Andersen abgeschätzt. Im Programm NAPA wurde der Widerstand nach der Methode von Holtrop 84 berechnet. Beide Prognosen wurden mit dem von DST gemessenen Widerstand des Schiffmodells in Abbildung 2.17 verglichen. Die Prognosen nach Andersen in Paramarine und Holtrop in Napa deckten sich bis 12 kn, bevor sie divergierten. Der gemessene Widerstand durch DST deckte sich mit Andersen bis 8 kn und stieg danach stärker an. Ein Ausschnitt des Vergleichs wurde in Abbildung 2.18 bis 12 kn dargestellt, woraus ersichtlich wurde, dass der Widerstand von Napa 10-15 % zu gering im Vergleich zum Modellversuch berechnet wurde. Die Modellversuche in Abbildung 2.19 haben gezeigt, dass das Schiff bei 10° Drift und 10° Krängung einen höheren Widerstand aufweist als ohne Drift und Krängung. Bei 20° Drift und 10° Krängung allerdings war der Widerstand geringer. Weitere Ergebnisse der Modellversuche waren, dass die Querkraft, die Tauchung sowie die freie Krängung mit größerem Driftwinkel zunehmen.

Die Querkraft und der Querkraftwiderstand durch Drift wurden zunächst durch die Methode von Wagner (1968) berechnet, welcher Schrägschleppversuche mit einem Seglerrumpf durchgeführt hatte. Die verwendeten Koeffizienten stammen von dem Forschungsschiff Meteor, welches sehr ähnliche Seitenverhältnisse wie der GreenSailer hat. Der Driftwiderstand in Schiffsängsrichtung lässt sich wie in Abbildung 2.20 über den Driftwinkel plotten. Interessanterweise schien das Schiff, einem angestellten Profil ähnlich, in einem gewissen Anstellwinkelbereich einen Auftrieb bzw. Vortrieb zu erfahren. Für bestimmte Kombinationen von Drift und Krängung konnte dies in den Modellversuchen wie in Abbildung 2.19 ebenfalls beobachtet werden.

Ist der Widerstand des Schiffes bekannt, kann eine erste Geschwindigkeitsprognose wie in Abbildung 2.21 erstellt werden. Mit einem Rigg bestehend aus Hochsegeln, wie später in AP4 beschrieben, wurde die Vortriebsleistung der Segel bei Windstärke 6 berechnet. Der Schnittpunkt von Segelvortriebskraft und Schiffswiderstand gibt die zu erwartende Schiffsgeschwindigkeit unter der jeweiligen Konstellation von

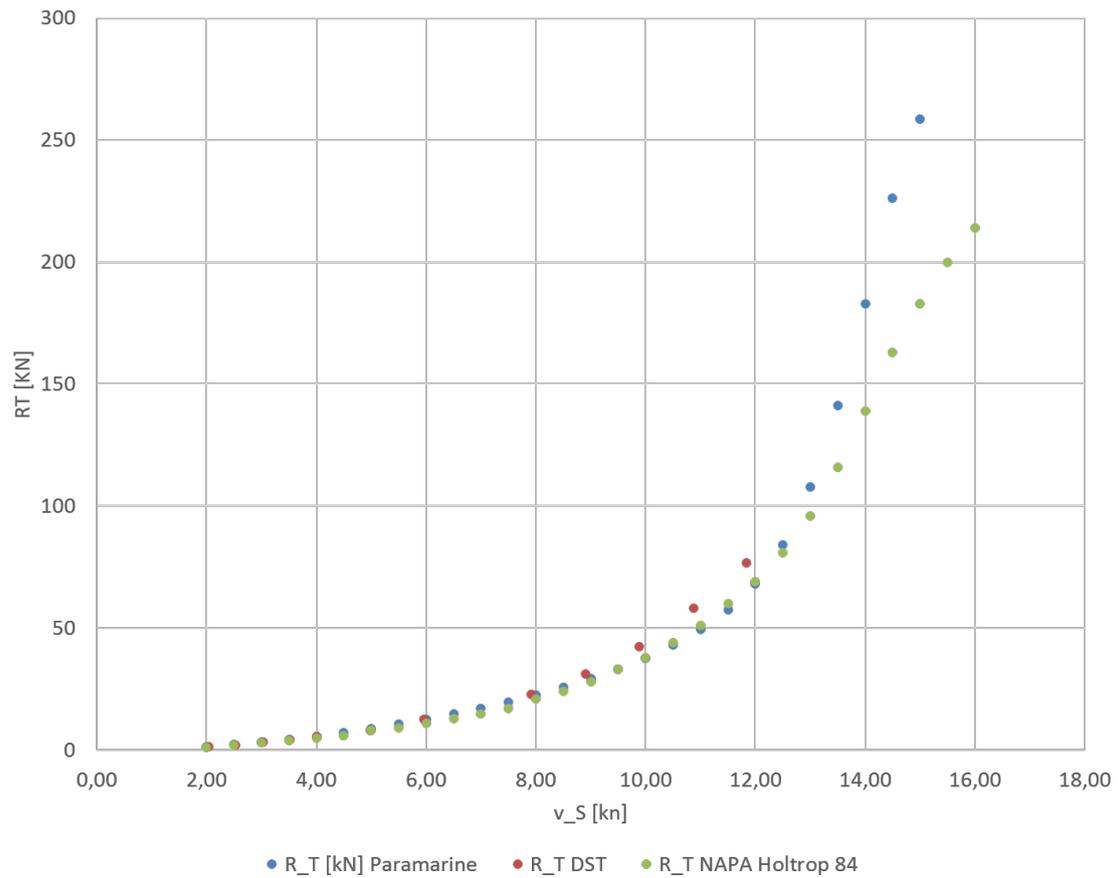


Abbildung 2.17.: Vergleich der Widerstandsprognosen in Paramarine (Andersen), NAPA (Holtrop 84) und gemessener Widerstand des Schiffmodells (DST)

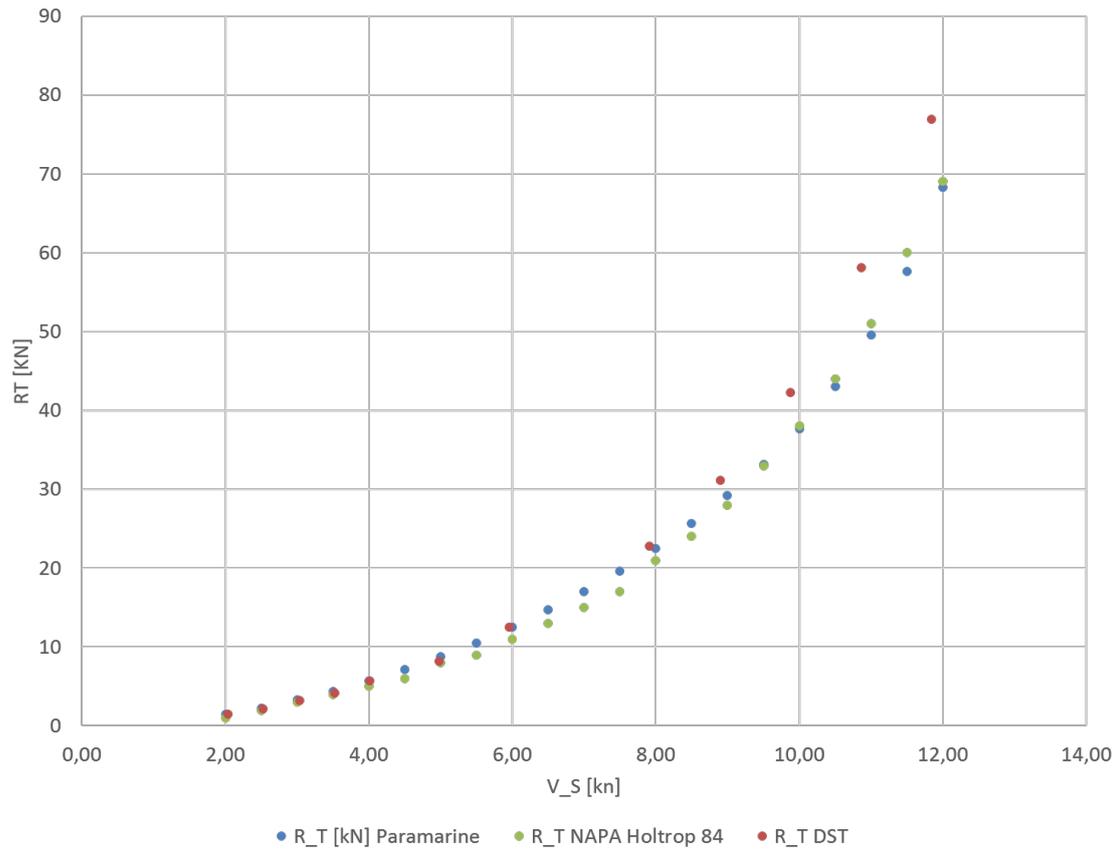


Abbildung 2.18.: Vergleich der Widerstandsprognosen in Paramarine, NAPA und des gemessenen Widerstandes vom Schiffmodell

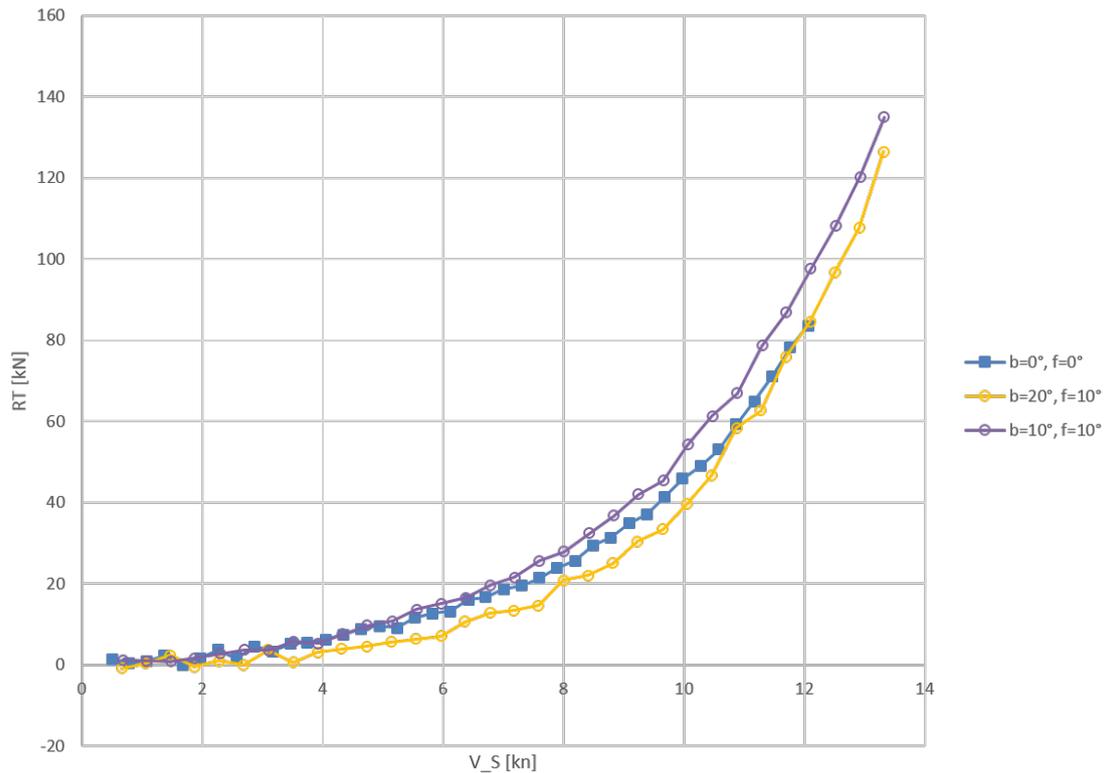


Abbildung 2.19.: Widerstand des Schiffmodells unter Drift und Krängung (hochgerechnet auf die Großausführung); b = Driftwinkel, f = Krängungswinkel

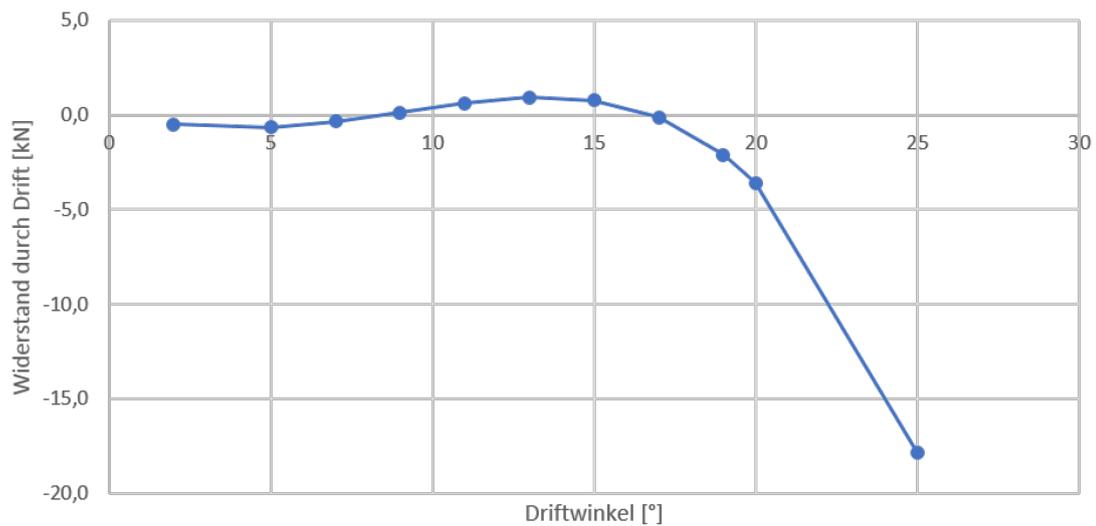


Abbildung 2.20.: Zusatzwiderstand durch Drift, hier bei 7,6 kn

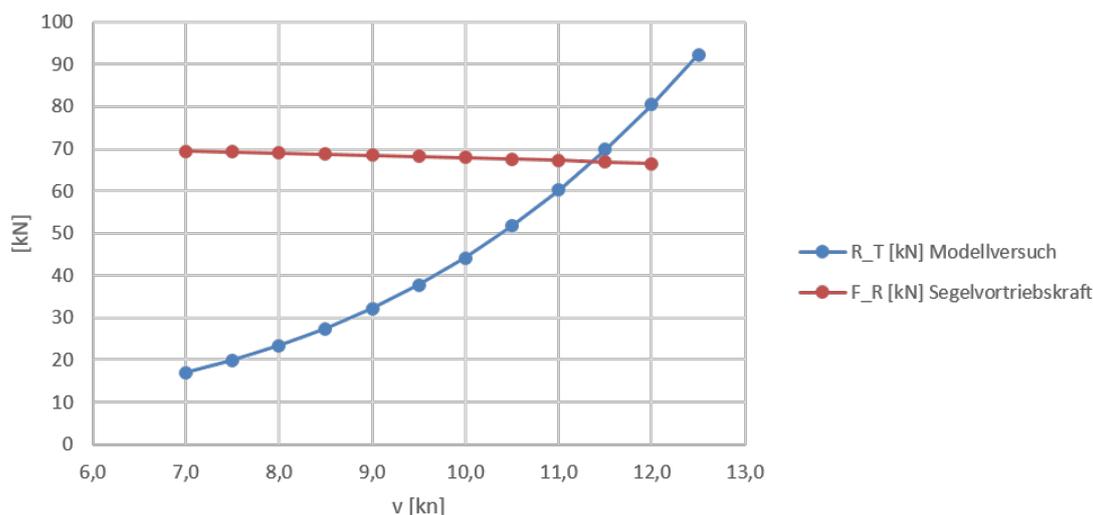


Abbildung 2.21.: Zu erwartende Schiffsgeschwindigkeit unter Segeln bei 30° Anstellwinkel, 6 Bft Wind, wahrer Wind 60°

Windstärke und -Richtung sowie Segelanstellwinkel an.

Des Weiteren wurden CFD-Untersuchungen mit dem TAHARA-Solver in NAPA durchgeführt, um das entstehende Wellenbild am Schiff zu untersuchen. Dazu wurde das Schiff in einzelne Blöcke unterteilt und ein Gitter darüber gelegt. In den Abbildungen 2.22 und 2.23 ist das Wellenprofil bei 8 und 12 kn Fahrt in der Draufsicht zu sehen. Die durchgezogenen Linien stellen Wellenberge über dem Design-Tiefgang von 3,90 m dar, die gestrichelten Linien Wellentäler. Abbildung 2.24 zeigt den zu erwartenden Wellenverlauf entlang des Schiffes mit Wellenbergen und -Tälern bei 12 kn Fahrt. Die schwarze Linie ist die Wasserlinie, welche direkt am Schiff verläuft. Die gestrichelte rote Linie zeigt den Wellenverlauf bei $y = 2,91$ m, die grüne Linie bei $y = 8,74$ m und die violette Linie bei $y = 29,12$ m, also weit entfernt vom Schiff. Das dazugehörige Bild aus dem Modellversuch ist zum Vergleich in Abbildung 2.25 zu sehen, wobei die Fahrriichtung entgegengesetzt zur Darstellung des Wellenprofils ist.

Bei 12 kn ist nach Abbildung 2.26 zu erwarten, dass der Heckspiegel des GreenSailers die Heckwelle bis ganz nach oben zieht, was eine längere benetzte Oberfläche, mehr Reibung und somit einen erhöhten Widerstand bedeutet. Besser wäre hier, wie in Abbildung 2.27 dargestellt, eine klar definierte Abrisskante unter Wasser statt ein lang auslaufendes Heck. Allerdings zeigt Abbildung 2.28 vom Modell, dass der Wasserspiegel nicht so weit angehoben wird. Jedoch wird dies mehr und mehr der Fall, je höher die Drift- und Krängungswinkel werden, wie in Abbildung 2.29 zu sehen ist.

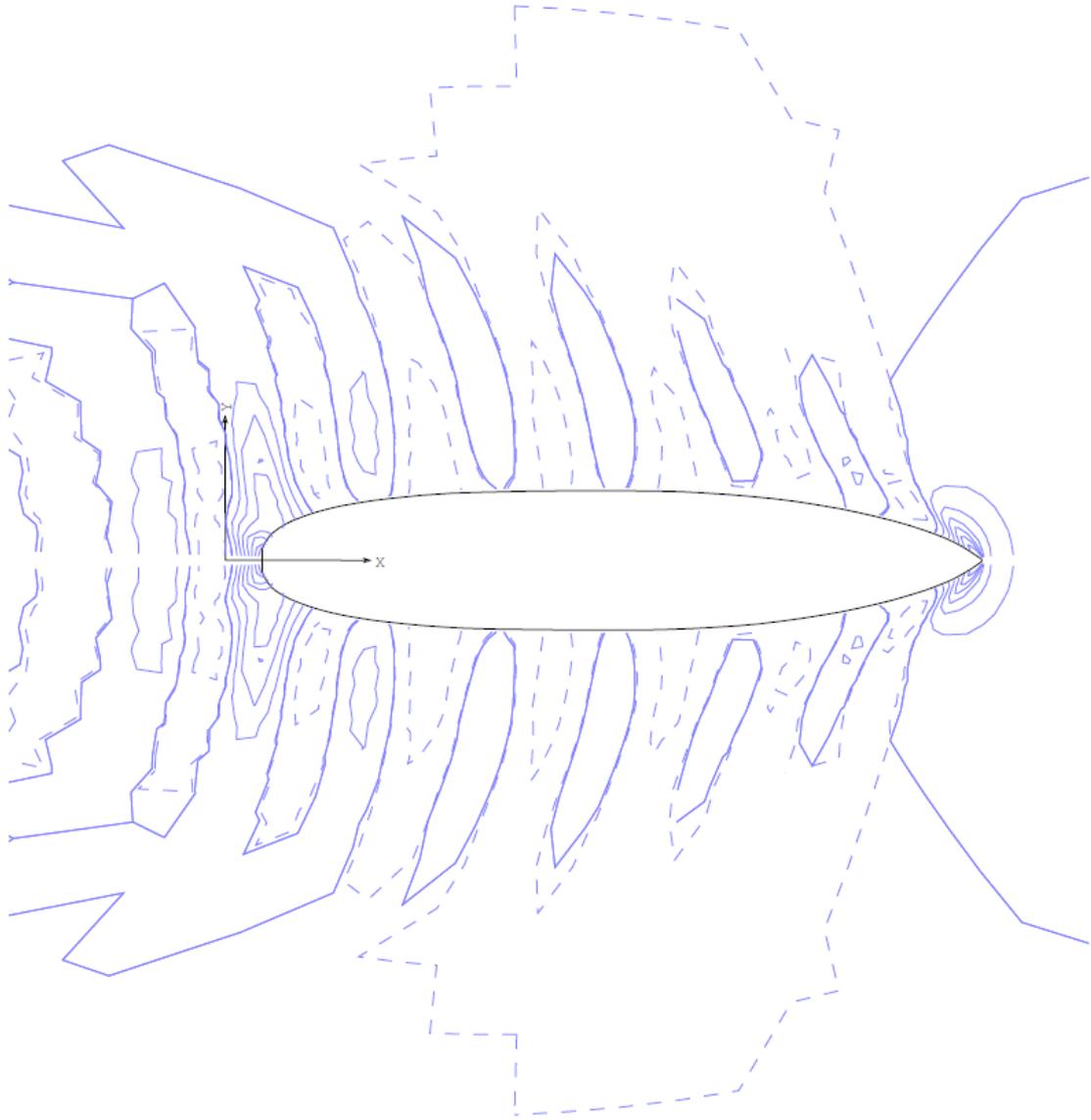


Abbildung 2.22.: Wellenprofil bei 8 kn Fahrt

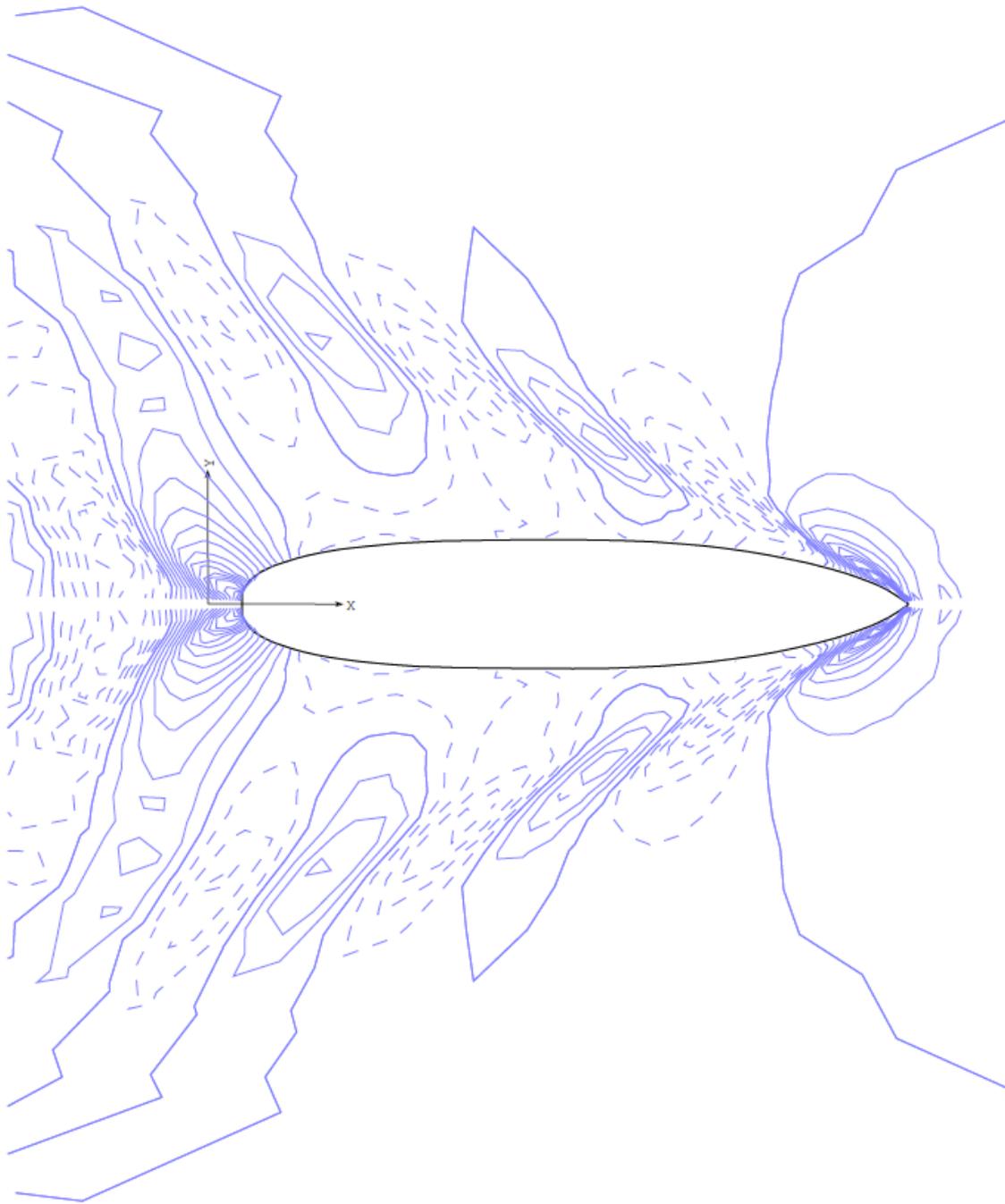


Abbildung 2.23.: Wellenprofil bei 12 kn Fahrt

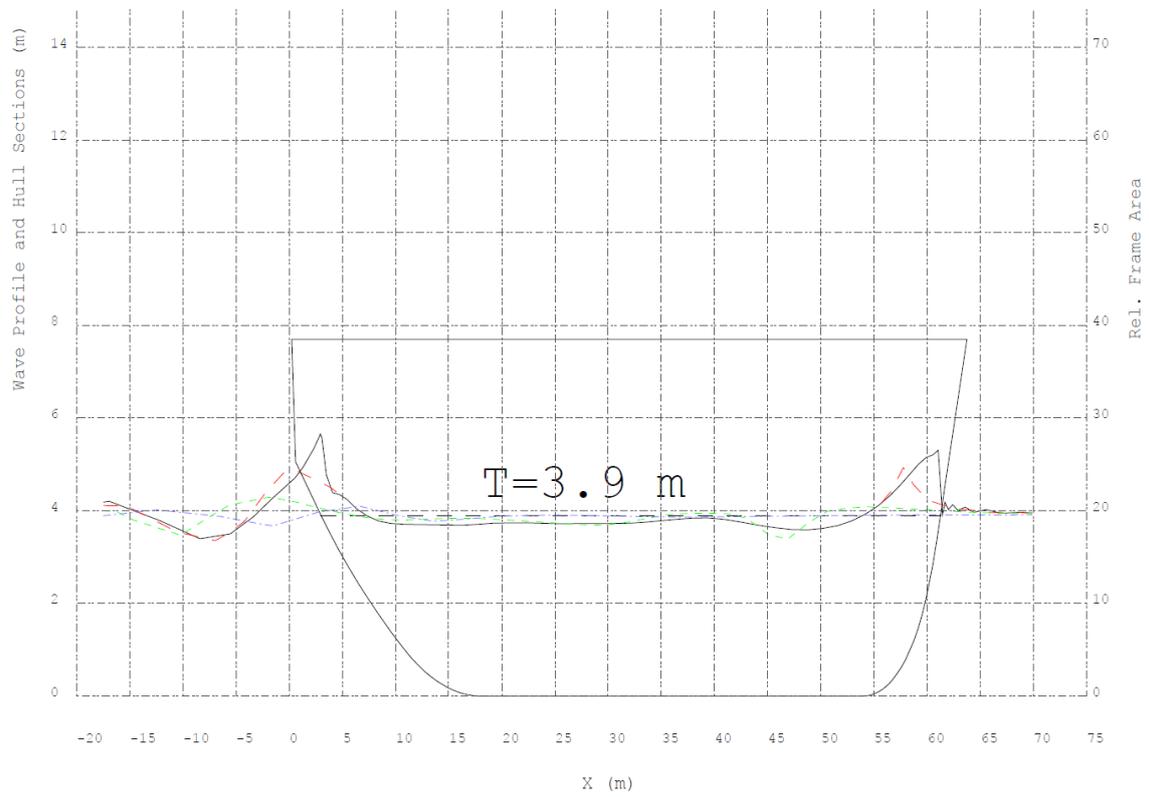


Abbildung 2.24.: Seitenansicht des berechneten Wellenprofils bei 12 kn Fahrt



Abbildung 2.25.: Seitenansicht des Wellenprofils am Modell bei 12 kn Fahrt (Friedhoff u. Tenzer, 2018)

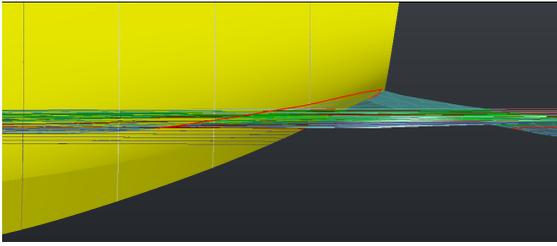


Abbildung 2.26.: Seitenansicht des simulierten Wellenprofils bei 12 kn Fahrt

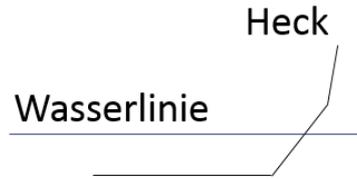


Abbildung 2.27.: Vorschlag eines Hecks mit definierter Abrisskante

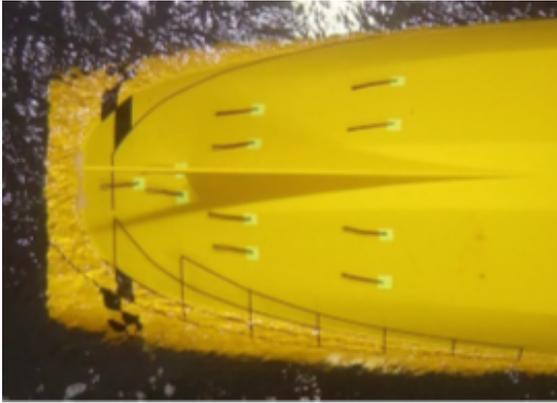


Abbildung 2.28.: Wellenbild bei 12 kn Fahrt, 0° Drift, 0° Krängung (Friedhoff u. Tenzer, 2018)

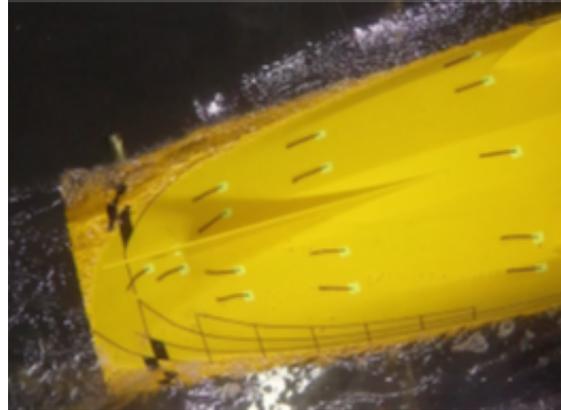


Abbildung 2.29.: Wellenbild bei 12,5 kn Fahrt, 16° Drift, 10° Krängung (Friedhoff u. Tenzer, 2018)

2.3.2. Seegangseigenschaften

Das Modell ist in Wellen von vorne bei 10 kn Fahrt für die Großausführung geschleppt worden. Abbildung 2.30 zeigt den gemessenen und den von DST berechneten Zusatzwiderstand C_{AW} durch Wellen über die Begegnungsfrequenz ω_E . Der Zusatzwiderstand R_{AW} durch Wellen kann dann über die Formel des Widerstandsbeiwertes C_{AW} berechnet werden (Friedhoff u. Tenzer, 2018), wobei ζ_A in diesem Fall die Wellenamplitude mit 0,66 m ist:

$$C_{AW} = \frac{R_{AW}}{\zeta_A^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{B^2}{LWL}} \quad (2.1)$$

In Abbildung 2.31 wurde das Modell bei 11,45 kn in der Großausführung unter verschiedenen Driftwinkeln in irregulärem Seegang in der Bewegungsrichtung von vorne geschleppt. Gezeigt ist der mit der Wellenamplitude ζ_A normalisierte Rollwinkel φ . WS4 ist dabei das gewählte Wellenspektrum mit einer signifikanten Wellenhöhe von

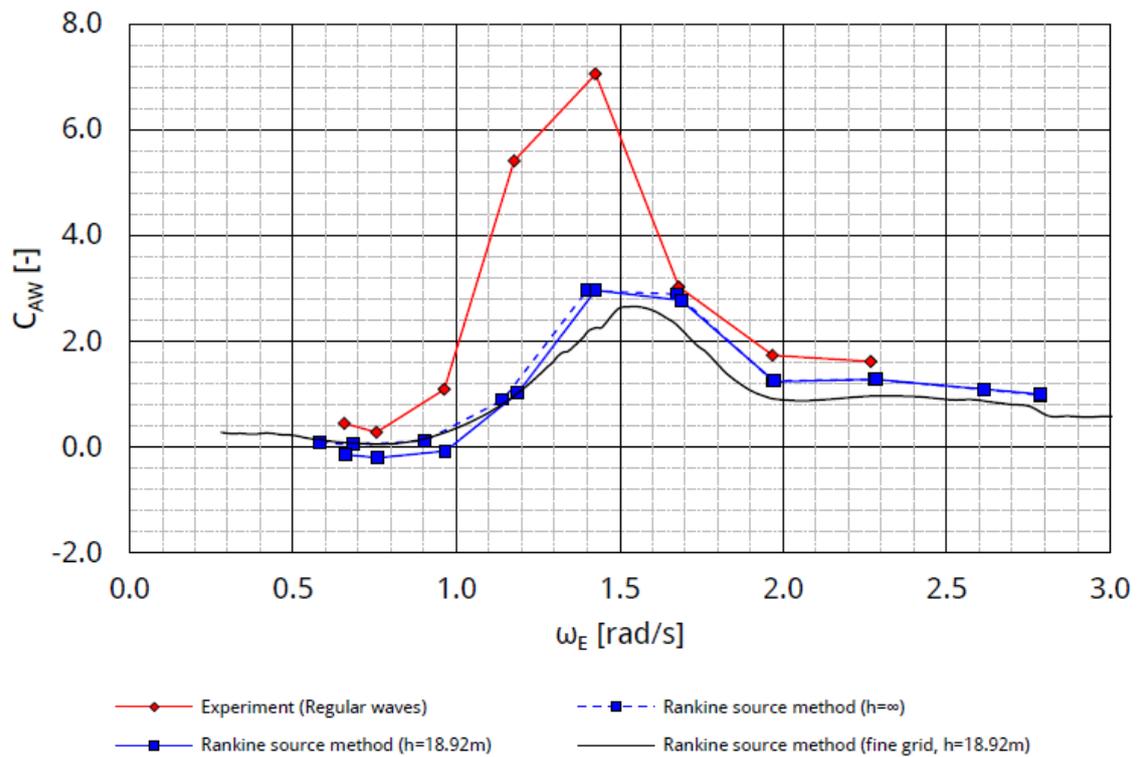


Abbildung 2.30.: Zusatzwiderstandsbeiwert c_{AW} für regulären Seegang von vorne bei 10 kn Fahrt und mit der Wellenamplitude $\zeta_A = 0,66$ m in der Großausführung (Friedhoff u. Tenzer, 2018)

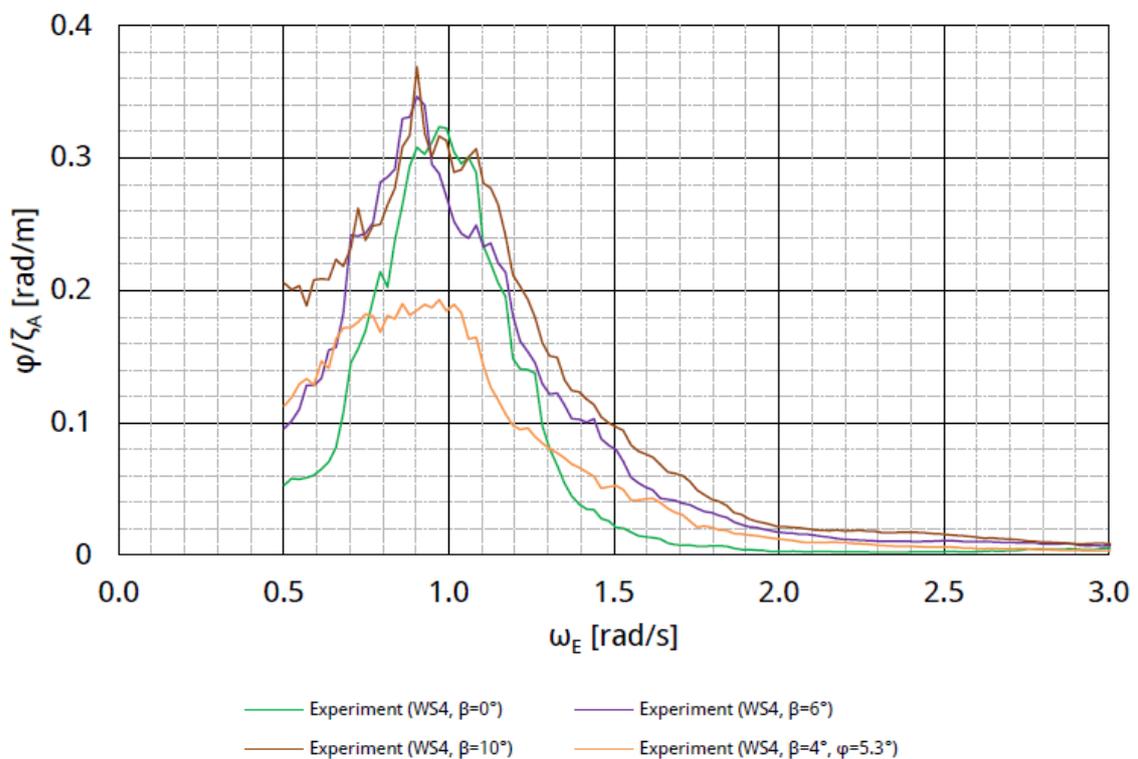


Abbildung 2.31.: Rollbewegung in irregulärem Seegang von vorne bei verschiedenen Driftwinkeln bei 11,45 kn (Friedhoff u. Tenzer, 2018)

1,13 m und einer Peakperiode von 4,95 Sek. Weitere Seegangseigenschaften und eine genauere Auswertung sind im Versuchsbericht von Friedhoff u. Tenzer (2018) zu finden.

2.4. Manövriersysteme

Da reine Segelschiffe günstige Windbedingungen zum Manövrieren im Hafen benötigen, diese aber häufig nicht gegeben sind, müssen teure Hafenschlepper angefordert werden (Hurford u. Barker, 2020). Ihr Einsatz ist schädlich für die Umwelt und kontaminiert so den Grundgedanken des GreenSailers. Daher ist es sinnvoll, wenn Segelschiffe ihren eigenen Motor haben, welcher auch elektrisch sein kann. Zu den Manövriersystemen zählen die Hauptmaschine, Propeller, Ruder und Querstrahler.

2.4.1. Auslegung der Hauptmaschine

Im reinen Motorbetrieb soll der GreenSailer 8 kn auf Glattwasser und im Tiefwasser erreichen können. Die erforderliche Maschinenleistung wird jedoch für 3 kn Fahrt bei Bft 10 ausgelegt, damit der GreenSailer auch diese Maximalanforderung erfüllen kann.

Der Windwiderstand berechnet sich zu

$$R_{T,Wind} = \frac{\rho_A}{2} \cdot v_W^2 \cdot A \cdot c = \frac{1,25 \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} \cdot 27 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 145,86 \text{ m}^2 \cdot 1 = 66,46 \text{ kN} \quad (2.2)$$

Wobei A die frontale Windangriffsfläche, ρ_A die Dichte der Luft, v_W die Windgeschwindigkeit bei 10 Bft und c ein Beiwert sind.

Es wird angenommen, dass der Seegangwiderstand genauso hoch ist, wie der Windwiderstand. Es werden also 132,91 kN auf den Glattwasserwiderstand von 3,76 kN bei 3 kn Fahrt nach DST-Modellschleppversuchen addiert. Somit ergibt sich $R_{T,Sturm} = 136,67 \text{ kN}$.

Dieser Widerstandswert liegt höher als derjenige für 8 kn Fahrt bei 3 Bft Wind und wird daher für die Auslegung der Maschine verwendet. Die Eingangsgrößen für die

Auslegung der Maschine sind:

$$\begin{aligned}
 v_S &= 3kn = 1,54m/s \\
 R_{T,Sturm} &= 136,67kN \\
 C_B &= 0,52 \\
 \eta_S &= 0,98 \text{ (bei 2 \% Lagerverlust; 0,955 bei zusätzlichen 2,5 \% Getriebeverlust)}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Für einen konservativen Entwurf werden die Sogziffer t und die Nachstromziffer w mit

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2 \\
 w &= 0,12
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

angenommen.

Die Anströmgeschwindigkeit des Propellers v_A beträgt somit:

$$v_A = v_S \cdot (1 - w) = 1,36m/s \tag{2.5}$$

Die effektive Leistung P_E berechnet sich aus dem Glattwasserwiderstand RT und der Schiffsgeschwindigkeit:

$$P_E = RT \cdot v_S \tag{2.6}$$

Der Schiffseinflussgrad η_H ist:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} \tag{2.7}$$

Die Schubleistung P_T , die der Propeller mindestens erbringen muss, ist:

$$P_T = \frac{P_E}{\eta_H} = T_{Prop} \cdot v_A \tag{2.8}$$

wobei T_{Prop} die erforderliche Schubkraft für den Propeller ist. Durch Umstellen der Formeln ergibt sich:

$$T_{Prop} = \frac{P_E}{\eta_H \cdot v_A} \frac{R_T}{1 - t} = 170,84kN \tag{2.9}$$

Somit ist $P_T = 232,04$ kW.

Für die erforderliche Bremsleistung für den Motor ergibt sich:

$$P_B = \frac{P_T \cdot \text{sea margin} \cdot \text{engine margin} \cdot \text{fouling}}{\eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_S} \quad (2.10)$$

mit den Annahmen:

Engine margin = 10 %

Sea margin = 15 %

Fouling = 0.9 % nach der Third IMO greenhouse gas study (IMO, 2015)

Statt der engine margin und der sea margin wird hier mit erhöhtem Widerstand durch Wind und Wellen gerechnet. Der Gütegrad der Anordnung wird $\eta_R = 1$ gesetzt. Mit einer ersten Abschätzung des Propellerwirkungsgrades von $\eta_0 = 0,5$ ergibt sich ein Leistungsbedarf von $P_B = 521$ kW.

Die auf diese Weise berechnete notwendige Leistung wurde als zu hoch bewertet. Andere Szenarien ergeben:

3 kn bei 8 Bft Wind und Wellen:	241 kW
3 kn bei 10 Bft Wind und Wellen:	521 kW
1 kn bei 10 Bft Wind und Wellen:	170 kW
8 kn bei Glattwasser inkl. margins:	306 kW

2.4.2. Auslegung des Propellers

Es wurde entschieden den Propeller auf 8 kn auszulegen. Mit einem Freischlag von 20 % des Propellerdurchmessers kann er maximal 2,50 m im Durchmesser haben. Für die Propellerauslegung auf Glattwasser und Tiefwasser gilt:

$$v_S = 8 \text{ kn} = 4,12 \text{ m/s}$$

$$RT = 23,4 \text{ kN nach DST-Modellschleppversuch für 8 kn}$$

Aus der Formel 2.9 ergibt sich ein benötigter Schub von 31 kN. Der Schubbeiwert K_T berechnet sich wie folgt:

$$K_T = \frac{T_{Prop}}{\rho n^2 D^4} = 0,165 \quad (2.11)$$

mit einer Drehzahl von 130 U/min und einem Propellerdurchmesser von 2,50 m. Mit einem Polynom von der Wageningen B-Propellerserie (Bernitsas u. a., 1981) für einen vierflügeligen Propeller mit einem Flächenverhältnis von 0,7 kann das Steigungsverhältnis gefunden werden, welches den benötigten Schub ins Wasser übertragen kann.

Das optimale Steigungsverhältnis beträgt $P/D = 0,945$. Mit einem Drehmoment von 12,85 kNm und einem Wirkungsgrad von $\eta_0 = 0,64$ ergibt sich inklusive Sea margin, Engine margin und Fouling für den Motor:

$$P_B = 250 \text{ kW bzw. } 200 \text{ kW ohne margins.}$$

Auf dieser Basis wurde ein Motor ausgewählt, der diese Leistung bei einem guten Wirkungsgrad erbringen kann. Es musste darauf geachtet werden, dass das für den Propeller erforderliche Moment erzeugt werden kann. Ein Motor der exemplarisch verwendet werden kann ist der TF62.60 von Oswald. Dieser hat maximal 315 kW Leistung bei 150 rpm, sodass man nach obiger Szenarienaufstellung etwa zwei Knoten bei 10 Bft Wind schaffen könnte.

2.4.3. Auslegung des Ruders

Der Ruderentwurf ist sowohl nach Klasseregeln (DNVGL-RU-SHIP-Pt.3 Ch.14 Rudder and steering) als auch nach einer physikalischen Kräfte- und Momentenbetrachtung durchgeführt worden, da die Klasseregeln nicht explizit für Segelschiffe ausgewiesen sind. Jedoch werden Schlepper und Trawler abgedeckt, die ähnlich hohe Giermomente erfahren können. Der detaillierte Ruderentwurf ist im Rahmen einer Bachelorarbeit (Sonnenberg (2019)) durchgeführt worden. Es wurde ein Vollscheiberuder gewählt, welches im Vergleich zu anderen Rudertypen leichter zu montieren ist, eine geringere Leistung der Rudermaschine benötigt und somit geringere Investitions- und Wartungskosten aufweist. Als Ruderprofil wurde ein NACA 63-021 gewählt, welches einen relativ geringen Widerstand bei kleinen Ruderwinkeln hat. Die Abmaße des Ruders sind wie folgt:

Ruderfläche	7,2 m ²
Ruderspan	3,20 m
Rudersbreite	2,25 m
Flächenverhältnis	1,42

Für die Auslegung nach dem Momentengleichgewicht wurde eine Extremsituation bei 30 kn Wind angenommen, wo die höchsten zu erwartenden Seitenkräfte durch die Segel auftreten. Mit berücksichtigt wurden Drift und Krängung. Der dazu passende Wert der Rumpfseitenkraft wurde aus den Modellversuchen ermittelt. Durch die Querkraft der Segel entsteht ein Momentenungleichgewicht, das durchs Ruder ausgeglichen werden muss, um das Schiff auf Kurs zu halten. Es konnte gezeigt werden, dass mit der verbleibenden Ruderkraft eine zuvor definierte Mindestdrehrate zum Manövrieren eingehalten werden kann.

Der Arbeit von Sonnenberg (2019) kann weiterhin entnommen werden: “Während sich konventionelle Schiffe auf international geltende Richtlinien stützen können, finden diese bei Segelschiffen aktuell keine Anwendung (vgl. SOLAS 74, Teil A, Regel 3). Dies hat zur Folge, dass die allgemeinen Entwurfsschemata der Klassifikationsgesellschaften, die sich ebenfalls auf die internationalen Richtlinien beziehen, nicht für Segelschiffe vorgesehen sind und daher angepasst werden müssen. Anhand von Überlegungen im Zusammenhang mit den übergeordneten und allgemein gültigen Kollisionsverhütungsregeln von 1972 wurde ein Fahrtmanöver und daraufhin eine Manövrieranforderung in Form einer Mindestdrehrate erfasst.

Aufgrund der wenigen erforderlichen Ausgangsdaten konnte ein erster Entwurf auf Grundlage der DNV GL-Richtlinien vorgenommen werden. Es hat sich herausgestellt, dass eine Anpassung lediglich in Form einer Ruderflächenkorrektur erforderlich war. Diese erfolgte nach direkter Rücksprache mit dem DNV GL. Für den weiteren Entwurfsablauf konnten alle Parameter eindeutig bestimmt werden, sodass dieser ohne Einschränkungen nach dem vorgegebenen Schema durchgeführt werden konnte.

Die sich anschließende physikalische Betrachtung anhand eines Momentengleichgewichts zeigte, dass ein detailliertes Bestimmen der erforderlichen Ruderkraft anhand eines individuellen Schiffsprofils unter Einbeziehung von Windstärke und Richtung grundsätzlich möglich ist. Hierfür wurden die jeweiligen aero- und hydrodynamischen Einzelkräfte sowie deren Druckpunktlagen zunächst erfasst, um daraufhin eine Momentenbilanz vorzunehmen. Aus dem resultierenden Ungleichgewicht konnte die erforderliche Ausgleichskraft abgeleitet und daraufhin die zur Einhaltung der Manövrieranforderungen verbliebene Ruderkraft erfasst werden. Anschließend wurde mit Hilfe der vorliegenden reduzierten Ruderkraft abgeschätzt, ob die eingangs definierte Drehrate eingehalten wurde. []

Im Rahmen eines weiteren Vorgehens konnte eine Annäherung an die geforderte Drehrate unter weiterer Verwendung der Klassifikationsrichtlinien erfolgen. Die Reduzierung der Ruderfläche durch das Anpassen des Faktors c_1 [] sowie eine entsprechende Anpassung des Seitenverhältnisses stellten eine Möglichkeit dar. Hierfür war auf eine Reduzierung der Ruderbreite einschließlich variabler Anpassung über die Ruderhöhe vorrangig zu achten, da die positiven Effekte eines höheren Seitenverhältnisses zum Tragen kommen und zudem das Rudermoment durch einen reduzierten Hebel sinkt. Dies hat wiederum zur Folge, dass der erforderliche Ruderstockdurchmesser verringert werden konnte und ggf. hydrodynamisch günstigere Profiltypen wie das NACA63-018 in Frage kamen. Zusätzlich ist ein Herabsetzen der Ruder-

maschinenleistung möglich. Dennoch ist zu beachten, dass eine Reduzierung der Ruderfläche zu höheren konstanten Ruderwinkeln führt. Es ist daher zu überprüfen, ob die Gesamteffizienz tatsächlich erhöht wird. Es konnte weiterhin bestätigt werden, dass der Profiltyp der NACA63-Serie für den Entwurfsfall geeignet ist. Für die zu erwartenden Ruderwinkel im überwiegenden Standardbetrieb hat sich gezeigt, dass die hydrodynamischen Eigenschaften des gewählten Profiltyps vorteilhaft sind.” (Sonnenberg, 2019)

2.4.4. Auslegung des Querstrahlers

Nach Grafik 1.1.14 im Handbuch von Brix (1987) wird ein Wert für die gewünschte Drehrate gefunden. Bei z.B. $48^\circ/\text{min}$ bzw. $0,8^\circ/\text{s}$ ergibt sich bei einer Schiffslänge L_{PP} von 58,25 m das Verhältnis von Schub zu Lateralfäche:

$$f = 0,06 \frac{kN}{m^2} \quad (2.12)$$

Nach Formel (1.1.28) beträgt die Jet-Querkraft:

$$Y_0 = f \cdot L_{PP} \cdot T = 0,06 \frac{kN}{m^2} \cdot 58,25m \cdot 3,9m = 13,6kN \quad (2.13)$$

Die nominelle Jet-Geschwindigkeit nach Formel (1.1.12) ist:

$$v'_j = \sqrt{\frac{Y_0}{\rho A_T}} = \sqrt{\frac{13600N}{1025 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,64m)^2}} = 6,42m/s \quad (2.14)$$

Der Wert sollte zwischen 5 und 8 m/s liegen. A_T ist die Querschnittsfläche des Tunnels. Der kleinste Querstrahler STT 60 von SCHOTTEL hat einen maximalen Propellerdurchmesser von 0,62 m. Ein Freiraum von 1 cm von Propeller zu Tunnel wird angenommen.

Nach Formel (1.1.10) beträgt der spezifische Schub:

$$c = \frac{2}{v'_j} = 0,31 \quad (2.15)$$

wobei etwa die Hälfte davon c_0 sein soll:

$$c_0 = \frac{c}{2} = 0,156 \frac{kN}{kW} \quad (2.16)$$

Mit Formel (1.1.11) ergibt sich ein Leistungsbedarf von:

$$P_0 = \frac{Y_0}{c_0} = \frac{13,6kN}{0,1376 \frac{kN}{kW}} = 87,34kW \quad (2.17)$$

Der STT 60 hat 110 kW. Der Propellerdurchmesser könnte demnach etwas kleiner gewählt werden, andererseits ist eine Leistungsreserve bei Bewuchs sinnvoll. Somit beträgt der Tunneldurchmesser ca. 0,64 m.

2.5. Zero emission ship

Im Nachfolgenden wurden verschiedene Energieträger und Energieerzeugungsarten betrachtet. Um den GreenSailer als Zero Emission Ship betreiben zu können sollte auf die Verwendung von Diesel verzichtet werden. Stattdessen wurden andere natürliche oder synthetisch hergestellte Stoffe wie Wasserstoff, Methanol oder batterieelektrische Systeme untersucht.

2.5.1. Wasserstoff als Brennstoff

Die Designer des Wind Challengers verfolgen den Ansatz, beim Segeln den Propeller durch die Wasseranströmung mitdrehen zu lassen, um mit dem E-Motor als Generator Strom zu erzeugen. Durch Elektrolyse wird aus Wasser Wasserstoff gewonnen. Um ihn in verflüssigter Form besser lagern zu können, wird er mit Toluol zu Methylcyclohexan umgewandelt, was aber hochgradig umweltschädlich ist. Wenn die gespeicherte Energie wieder freigesetzt werden soll, wird mittels Dehydrierung wieder Wasserstoff erzeugt, um ihn in einer Brennstoffzelle wieder zu Strom umwandeln zu können (Ouchi u. Omiya, 2019). Die Vorgänge der Hydrierung und Dehydrierung benötigen jedoch hohe Temperaturen wie in Abbildung 2.32 zu sehen, sodass der Wirkungsgrad gering sein dürfte. Die Abwärme könnte zum Heizen verwendet werden.

Allerdings gibt es wohl noch andere umweltfreundlichere Stoffe, die als liquid organic hydrogen carrier (LOHC) verwendet werden können (Horsmann, 2019). “Ein wesentlicher Faktor sei die Energiemenge, die gespeichert werden soll”, so Horsmann (2019). “Bei Batterien verdoppelten sich die Kosten bei einer Verdoppelung der Speichermenge. LOHC sei deshalb bei großen Speichermengen deutlich günstiger. So würden etwa zur Speicherung von zwei Megawattstunden Energie rund 1000 Liter LOHC benötigt, die bei der Erstbeschaffung etwa 3000 Euro kosten und danach viele 100 Mal wiederverwendet werden können. Bei Batterien müsste man für die gleiche Speichermenge heute einen Millionenbetrag aufwenden.” Slinn (1020) gibt an, dass ein

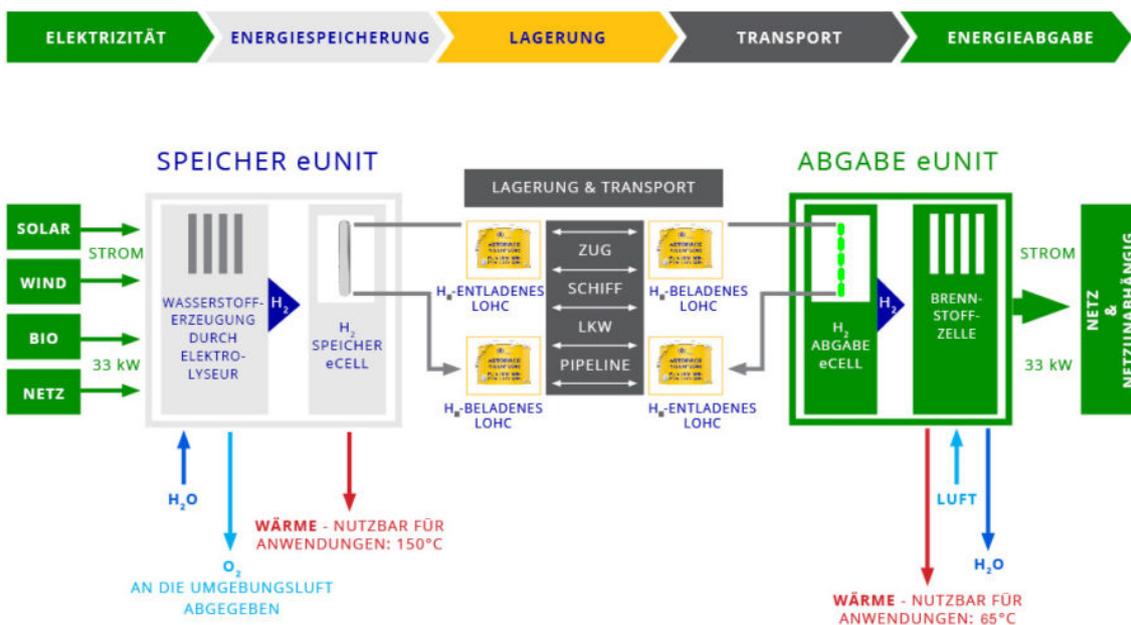


Abbildung 2.32.: Umwandlung Energie - Wasserstoff - Speicherung in LOHC - Wasserstoff - Energie (H2-Industries, 2019)

LOHC-System in der Größe eines 4 x 20 Fußcontainers etwa 20 Mal mehr Energie als eine Batterie gleicher Größe speichern kann. In Zukunft kann es möglich sein, den mit Wasserstoff angereicherten LOHC direkt zu bunkern. Die Dehydrierung benötigt dann bei der Verwendung von Dibenzyltoluen als LOHC allerdings 12 kWh/kg und 300 °C (Hydrogenious LOHC Technologies GmbH, 2110). Zudem ist eine nachfolgende Reinigung des abgeschiedenen Wasserstoffes für die PEM-Brennstoffzelle notwendig.

Alternativ könnte Wasserstoff in 200 bar Druckflaschen verwendet werden oder in einem Drucktank mit 350 bis 700 bar gelagert werden. Hierfür muss der Tank vom Typ 2 bis 4 aus Metall oder Kunststoff mit Faserverbundstoffen ummantelt sein (Stolzenburg, 2019). Bei einem Druck von 350 bar hat Wasserstoff eine Dichte von etwa 24 kg/m³. Für eine Fahrt von Cuxhaven nach Helgoland und zurück bei extremen Wetterbedingungen würde ein Volumen von 50 m³ benötigt, wozu ein Kugeltank mit einem Innendurchmesser von 4,60 m, zuzüglich der Wandstärke, benötigt werden würde.. Da das Verhältnis zwischen Dichte und Druck bei realen Gasen nicht linear ist, fasst ein Tank mit 700 bar nicht doppelt so viel Wasserstoff, sondern nur ca. 67 % mehr, da die Dichte des Wasserstoffes dann bei 40 kg/m³ liegt. Der notwendige Innendurchmesser des Kugeltanks würde dann 4 m bei einem Volumen von 30 m³ betragen (EMCEL GmbH, 2019). Wird Wasserstoff nach der Erzeugung auf 700 bar verdichtet, strömt es in einen Trailer über und hat dann noch 500 bar. Nach dem Überströmen aus dem Trailer in den Schiffstank herrschen dann noch

350 bar. Soll der Tank einen höheren Druck aufweisen, müsste der Wasserstoff unter Energieaufwand vor Ort erst wieder verdichtet werden. Die Energiedichte des Druckwasserstoffes beträgt etwa 1,1 kWh/l (Diesel hat ca. 10 kWh/l). Flüssigwasserstoff hat mit -253 °C eine Energiedichte von etwa 2,35 kWh/l, jedoch muss der Tank gut isoliert werden, wofür wiederum Platz benötigt wird. Der Flüssigwasserstoff wird an Bord nicht mehr aktiv gekühlt. Dies führt dazu, dass der Wasserstoff beginnt zu verdampfen, sodass der Druck im Tank steigt und sich das Sicherheitsventil öffnet, womit Wasserstoff verloren geht. 2019 gab es nur drei Verflüssiger in Europa (Stolzenburg, 2019).

Es muss berücksichtigt werden, dass der Brennstoff, in welcher Form auch immer, vorerst unter Energieaufwand und CO_2 -Ausstoß vom Hersteller zum Schiff gelangen muss. Sowohl Verdichtung und Verflüssigung als auch die Speicherung in einem LOHC benötigen Energie. Jedoch erfolgen die Lagerung und der Transport von LOHC "unter Umgebungsbedingungen (ohne spezielle Drucktanks, ohne Kühlung; ohne hohes zusätzliches Gewicht [wie es bei der Verwendung von Metallhydrid der Fall wäre], ungiftig, nicht explosiv und schlecht entflammbar)" (Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik, 2019).

Eine weitere Möglichkeit ist, Wasserstoff unter Wärmeabgabe in das Kristallgitter von Metallen oder intermetallischen Verbindungen einzulagern, sodass ein Metallhydrid entsteht. Zur Abgabe des Wasserstoffs muss wieder Wärme hinzugeführt werden. Man kann die Hydride der Desorptionstemperatur nach klassifizieren: Niedertemperatur (-20 bis 100 °C bei einer Wasserstoffspeicherdichte von 1,8 - 2,1 Gewichtsprozent), Mitteltemperaturhydride (100 bis 200 °C , 5,5 Gew.-%) und Hochtemperaturhydride ($> 200\text{ °C}$, 7,6 Gew.-%) (Schindler u. Schmidt, 2004). Anbieter von Metallhydrid-Speichern waren 2004 die Firmen Hera aus Deutschland, Ovonic aus den USA und Japan Steel Works.

Der Wirkungsgrad einer exemplarisch bei Ballard Power Systems angefragten Brennstoffzelle war bei 55 % Last am höchsten. Die 100 kW-Brennstoffzelle hatte in diesem Betriebszustand einen Wasserstoffbedarf von 9 kg/h. Dieser erhöhte sich um 12 %, wenn die Anlage unter Volllast betrieben wurde. Das angebotene System hatte ein Gewicht von 450 kg inklusive der Wasserkühlung und des Luftzufuhrsystems. Zum Zeitpunkt der Untersuchung lag der Preis der Anlage bei etwa 150.000 Euro. Größere Anlagen waren in Planung.

2.5.2. Methanol als Brennstoff

Eine weitere Möglichkeit ist, durch Zugabe von Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft oder als Abfallstoff der Industrie, aus Wasserstoff Methanol (CH_3OH) herzustellen. 2019 haben neun japanische Unternehmen die Ship Carbon Recycling Working Group gegründet, die durch Kohlenstoffrecycling von Stahlwerken eine emissionsfreie Schifffahrt erreichen wollen (Verband für Schiffbau und Meerestechnik E.V.). Methanol ist ein Kohlenwasserstoff, farblos, wasserlöslich, biologisch abbaubar und leicht entzündlich. Es ist bei Raumtemperatur flüssig und kann in einem isolierten Tank gelagert werden. Durch eine hohe Selbstentzündungstemperatur, eine hohe untere Explosionsgrenze und eine im Vergleich zu ölbasierten Kraftstoffen viermal so hohe Verdampfungsenthalpie ist Methanol ein sehr feuersicherer Brennstoff (Sahnen u. a., 2019).

Der volumenbezogene Heizwert ist zwar 2,3 Mal schlechter als bei Diesel, jedoch kann die Raumausnutzung im Rumpf höher sein, da Methanol im Gegensatz zu Diesel direkt an der Außenhaut gelagert werden darf. “Im Fall einer Freisetzung von Methanol besteht so gut wie keine Gefahr für die Umwelt, da Methanol sich in Wasser sehr schnell verdünnt und in wenigen Tagen von Bakterien vollständig biologisch abgebaut wird. [...] Es weist als Stoff selbst kein Treibhausgaspotential (Methan-Slip) auf.” (Sahnen u. a., 2019) Da Methanol als Grundstoff in der Chemie verwendet wird, wird er weltweit in großem Maßstab hergestellt und ist daher verfügbar, wengleich zur Zeit noch etwas teurer als Diesel. Werden Wasserstoff und Methanol durch erneuerbare Energien hergestellt, so kann das Schiff mit null Emissionen betrieben werden. Das freigesetzte Kohlenstoffdioxid ist zuvor der Luft entnommen worden, sodass Klimaneutralität herrscht. “Methanol verbrennt ohne Ruß- und Schwefelfreisetzung. [...] Doppelwandige Rohrleitungen und ein Zwei-Barrier-Konzept garantieren die Sicherheit an Bord. Insgesamt nehmen die Systeme zur Kraftstofflagerung und Energieversorgung weniger wertvollen Platz als bei LNG-Systemen ein.” (Sahnen u. a., 2019)

Methanol kann in Motoren verbrannt oder in Brennstoffzellen zu Energie umgewandelt werden. Bei Dual Fuel-Motoren benötigt man für die Verbrennung von Methanol etwas Diesel für die Zündung und Stickstoff, um die Methanalleitungen vorher durchzuspülen. Nach Bomanson u. Ramne (2018) wird genauso viel Stickstoff wie Methanol gebraucht. Des Weiteren kann Stickstoff die Methanoloberfläche im Tank bedecken, um der Entstehung von brennbaren Gasen vorzubeugen.

Stickstoff kann entweder in austauschbaren Flaschen an Bord gelagert werden oder

z.B. durch ein Membranverfahren mit Druckluft an Bord erzeugt werden. Eine Stickstoffanlage kostet knapp 27.000 Euro (Bomanson u. Ramne, 2018), die Kosten für die Flaschen und den Austausch richten sich nach dem Verbrauch und müssten gegengerechnet werden. Eine Stickstoffanlage wäre aber bei einem langjährigen Gebrauch wesentlich günstiger, Logistik und Austausch der Gasflaschen entfallen.

Eine Methanol-Brennstoffzelle hätte den Vorteil, dass keine Stickoxide freigesetzt würden. Zurzeit gibt es jedoch nur 5 kW-Module der Firma SerEnergy A/S.

2.5.3. Anwendung im GreenSailer

Im Fall des GreenSailers wäre die Bunkerung und Verbrennung von regenerativ erzeugtem Methanol in Generatoren sinnvoll. Von den hiesigen Motorenherstellern gibt es derzeit nur große Methanol-Motoren und keine im 200 kW-Bereich, da es sehr aufwendig ist, u.a. das Kraftstoffsystem (Kraftstoffpumpen, Injektoren), das Einspritzsystem (Leckage, Schmierung, Dichtungen) und das Brennverfahren (Gemischhomogenisierung, Zündverzug) anzupassen (Caterpillar Marine). Für diese aufwändige Entwicklung von kleineren Motoren sei ein ausreichend großer Markt nötig, welcher 2018 noch nicht existierte (Kovacic). Allerdings wurden im Projekt SUM-METH zwei 300 kW Motoren von Weichai und Scania umgebaut, sodass sie mit 100 % Methanol betrieben werden konnten (Tunér u. a., 2018). Die Firma Billion Miles (BM) Singapore Pte Ltd hat jetzt aber Methanol-Generatoren bis 120 kW entwickelt, größere wären auf Anfrage sicher möglich. Sie brauchen 90 l/h und wiegen eingehaust 2,3 t.

Für den Fall, dass das Schiff auf der Route Cuxhaven - Helgoland eingesetzt wird und in Schlechtwetter operieren muss, würde es bedeuten, dass es ohne Windzusatzantrieb 36 Seemeilen zurücklegen muss. Wenn man davon ausgeht, dass auf Helgoland weder Wasserstoff noch Methanol nachgebunkert werden können, so verdoppelt sich die Strecke. Nach Kapitel 2.4.1 können mit dem gewählten Elektro-Motor etwa 2 kn bei Bft 10 und 3 kn bei Bft 9 erreicht werden, wobei der Bewuchs noch berücksichtigt werden müsste. Bei 3 kn Fahrt beträgt die Fahrzeit hin und zurück 24 Stunden. Wird das Schiff mit Methanol betrieben, bräuchten die vier 120 kW-Generatoren 8640 l Methanol. Bei einer Dichte von 792 kg/m^3 entspricht dies einem Volumen von 11 m^3 . Ist mit starker Tide-Strömung entgegen des Kurses zu rechnen, sollte das Schiff dennoch in der Lage sein, seine Fahrt fortzusetzen.

Hätte man fünf 100 kW-Brennstoffzellen an Bord, bräuchte man 1200 kg Wasserstoff. Das Schubschiff ELEKTRA in Berlin hat 6 Wechseltanks mit 500 bar Druckflaschen

an Bord, die insgesamt 750 kg Wasserstoff fassen. Somit wären für diese Fahrt 10 Wechseltanks notwendig, was einen Platzbedarf von 32 m² bedeuten würde. Sinnvoller wäre ein einzelner beispielsweise kugelförmiger Drucktank. Hinzu käme, dass im Hafen nicht nur die Ladung, sondern auch die Wechseltanks umgeschlagen werden müssten, was zusätzlich Zeit und Personalkosten bedeuten würde. Flüssigwasserstoff hat eine Dichte von 70,8 kg/m³, sodass man 17 m³ bräuchte, was mit den vorhandenen Tankkapazitäten möglich wäre.

Die Verwendung von Metallhydrid hätte den Vorteil, dass kein zusätzlicher Festballast in den sehr großen Bilgekielen, auf denen sich das Schiff beim Trockenfallen abstützen könnte, untergebracht werden müsste, was deren Einbindung in die Schiffsstruktur vereinfachen dürfte. 1200 kg Wasserstoff benötigen etwa 66,67 t Metallhydrid bei einer Speicherdichte von 1,8 % Wasserstoff. Ein von Wenger (2008) entwickeltes Speicherrohr ist 1 m lang und hat 0,22 m im Durchmesser, sodass es ein Volumen von 0,038 m³ hat. Darin können 8 g Wasserstoff gespeichert werden. Angenommen, ein großer Speicher würde auf die gleiche Art und Weise gebaut werden, so bräuchte man dafür 5700 m³. Während das zusätzliche Gewicht als unkritisch betrachtet wird, galt der Raumbedarf als potentiell zu hoch. Ein kleinerer Metallhydridspeicher mit einer Kapazität von etwa 100 g Wasserstoff könnte allerdings verwendet werden, um das Brennstoffzellensystem beim Kaltstart auf die gewünschte Betriebstemperatur zu erwärmen, denn bei der Durchströmung des Hydrids mit gasförmigem Sauerstoff entsteht Wärme. Nach Erreichen der gewünschten Temperatur kann der Hydridspeicher wieder entleert werden, was sogar noch einen Beitrag zur dann notwendigen Kühlung der Brennstoffzellen leisten kann. Der Vorteil des Einsatzes eines Metallhydridspeichers wäre, dass hierbei kein Wasserstoff verbraucht wird und Energieneutralität besteht (Wenger, 2008).

2.6. Stabilität

Das Leergewicht des Schiffes wurde in AP3 aus dem reinen Stahlgewicht in Poseidon ermittelt. Es ist in Tabelle 3.3 auf Seite 91 aufgeführt. Für die Stabilitätsrechnungen wurde es in NAPA in der ELE*ELEMENTS-Tabelle definiert. Weitere Gewichte der Schiffsausrüstung wurden in NAPA entsprechend ihrer Lage im Schiff angegeben. Sie können der beispielhaften Intaktstabilitätsrechnung im Anhang A.2.3 ab Seite 193 entnommen werden.

Eine Hydrostatik-Tabelle und Kurven sind im Anhang A.2.1 zu finden.

2.6.1. Intaktstabilität

In den internationalen Regelwerken für die Handelsschifffahrt gibt es keine Regularien mehr für Segelschiffe. Auch das DNV GL-Regelwerk für Yachten greift formal gesehen im Fall des GreenSailers nicht, denn es gilt per Definition in Part 5 ausschließlich für Yachten „used for pleasure“, die keine Fracht transportieren, und somit nicht für ein Küstenfrachtschiff als Dreimaster. Folglich muss zusammen mit dem Flaggenstaat abgestimmt werden, welche Vorschriften im Einzelnen angewendet werden sollen. Als Frachtschiff >500 GT unter deutscher Flagge und auf internationaler Fahrt würde der GreenSailer rein formal unter die Klassifikationsvorschriften für Seeschiffe sowie unter die SOLAS fallen. Unabhängig vom vereinbarten Regelwerk würde eine Klassifikationsgesellschaft wie der DNV GL mindestens ein $GM_0 > 0.15$ m im Maschinenbetrieb und ein $GM_0 > 0.60$ m im Segelbetrieb fordern – vorausgesetzt, dass die Leckstabilitätsberechnungen kein höheres GM_0 ergeben (Richter, 0420).

Wenn das Schiff unter Maschine fährt, müssen die allgemeinen Kriterien der IMO (2008) erfüllt sein. Diese sind:

- The area under the righting lever curve (GZ curve) shall not be less than 0.055 metre-radian up to $\Phi = 30^\circ$.
- The area under the righting lever curve shall not be less than 0.09 metre-radian up to $\Phi = 40^\circ$ or the angle of flooding (angle of heel at which non-weather-tight openings immerse).
- Additionally, the area under the righting lever curve (GZ curve) between the angles of heel 30° and 40° or between 30° and the angle of flooding, if this angle is less than 40° , shall not be less than 0,03 metre-radian.
- The righting lever GZ should be at least 0.20 m at an angle of heel equal to or greater than 30° .
- The maximum righting arm shall occur at an angle of heel preferably exceeding 30° but not less than 25° .
- The initial metacentric height GM_0 should be not less than 0.15 m. Recommended is a minimum $GM = 0.35$ m.

In NAPA sind die Kriterien wie folgt definiert (FAUN = angle of downflooding of unprotected openings):

Bei der Intaktstabilität geht man in NAPA von der Loading Condition (LD) zu den Stability Criteria (CR). Von dort werden die Relevant Criteria (RCR) aufgerufen, deren Definition man sich über den Befehl Describe (DES) anschauen kann.

LD?>CR

CR_I?>RCR

CR_I?>DES CRI 2008IS-A2.2

CRIT, V.AREA30, 'Area under GZ curve up to 30 deg'

TYPE, MINAREA

REQ, 0.055

RANG, 0, 30

OK

CRIT, V.AREA40, 'Area under GZ curve up to 40 deg.'

TYPE, MINAREA

REQ, 0.09

RANG, 0, MIN(40, FAUN)

OK

CRIT, V.AREA3040, 'Area under GZ curve between 30 and 40 deg'

TYPE, MINAREA

REQ, 0.03

RANG, 30, MIN(40, FAUN)

OK

CRIT, V.GZ0.2, 'Min. GZ > 0.2'

TYPE, MAXGZ

REQ, 0.2

RANG, 30, FAUN

OK

CRIT, V.MAXGZ25, 'Max. GZ at an angle > 25 deg.'

TYPE, POSMAX

REQ, 25

OK

CRIT, V.GM0.15, 'GM > 0.15 m'

TYPE, MINGM

REQ, 0.15

OK

Zusätzlich wird das Windkriterium betrachtet, das in NAPA als IMOWIND zu fin-

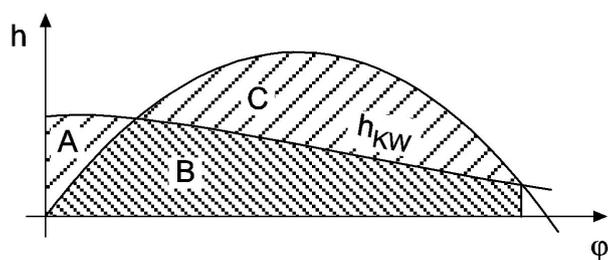


Abbildung 2.33.: Flächen unter Hebelarmkurven

den ist:

```
CR_1?>DES CRI 2008IS-A2.3
CRIT, V.IMOWEATHER, 'IMO weather criterion'
TYPE, ARATIO1
REQ, 1
RANG, EQ-ROLL, MIN(50, FAUN)
MOM, IMOWIND
OK
```

CRIT, 2008IS-A2.3.1.2, 'Heeling angle due to steady wind <16 or <=80% of deck imm.'

```
TYPE, MAXHEEL
REQ, MIN(16, FRB=<0.8)
MOM, IMOWIND_STEADY
```

Um die Sicherheit des Schiffes auch für den Segelbetrieb gewährleisten zu können, wurden zusätzlich die Stabilitätskriterien für Segeljachten betrachtet. Laut DNVGL-RU-YACHT-Pt3Ch10 müssen für Segelschiffe > 24 m mit bis zu 12 Passagieren die folgenden Kriterien erfüllt sein:

- The areas $B + C$ shall be not less than $1.4 (A + B)$, see Figure 2.33.
- The righting lever at the maximum of the lever arm curve shall be not less than 0.30 m.
- The stability range shall be not less than 60° for yachts without ballast keel.
- The stability range shall be not less than 90° for yachts with ballast keel.
- The initial metacentric height GM_0 shall not be less than 0.60 m.
- The static angle of heel under sails shall not exceed 20° , but in any way shall not be more than the angle of deck immersion.

Das erste Kriterium gibt es bereits in NAPA:

CRIT, A.AREA.70, 'ABS MODU Area A+B>1.4(B+C), 70 knot wind'
TYPE, ARATIO2
REQ, 1.4
MOM, MODU70
RANG, 0, FAUN

Die anderen wurden wie folgt definiert:

CRIT, GZ0.3, 'Max GZ > 0.30 m'
TYPE, MAXGZ
REQ, 0.3
OK

CRIT, RANGE90, 'Stability range > 90 deg'
TYPE, RANGE
REQ, 90
RANG, EQ, -
OK

CRIT, GM0.60, 'GM > 0.60 m'
TYPE, MINGM
REQ, 0.6
OK

Für das letzte Kriterium wurde angenommen, dass die Rotoren bzw. Segel nur bis zur Windstärke Bft 7 (16 m/s) betrieben werden. Somit ergibt sich ein Winddruck P pro Quadratmeter von:

$$P = \frac{\rho_A}{2} v_A^2 c = \frac{1,23 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \left(16 \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 1 = 157,44 \frac{N}{m^2} \quad (2.18)$$

Die Lateralfäche des Überwasserschiffes beträgt $385 m^2$. Die Fläche der Rotoren bzw. Segel wird nicht mit einbezogen, da ihr Anteil der krängenden Kraft in der erzeugten Seitenkraft steckt. Der vertikale Flächenschwerpunkt des Überwasserschiffes liegt bei 7,54 m. Der vertikale Hebelarm Z zwischen dem aerodynamischen und dem hydrodynamischen Druckpunkt beträgt 5,46 m, wenn angenommen wird, dass der hydrodynamische Druckpunkt im Flächenschwerpunkt 1,82 m unter der Wasserlinie liegt.

Das krängende Moment durch Wind ergibt sich zu:

$$M_W = \frac{P \cdot A \cdot Z}{g} = \frac{157,44 \frac{N}{m^2} \cdot 385m^2 \cdot 5,46m}{9,81 \frac{m}{s^2}} = 33,74tm \quad (2.19)$$

Bei 90° wahren Wind beträgt die Seitenkraft beider Rotoren zusammen 65,53 kN bzw. 6,7 t. Der Hebelarm beträgt 18,42 m, sodass das Moment 123,4 tm beträgt. Insgesamt ergibt sich zusammen mit dem Windmoment aus Gleichung 2.19 ein krängendes Moment von 157,15 tm. Es nimmt mit dem Cosinus des Krängungswinkels ab. Es wird wie folgt definiert:

```
CR_I?>MOM WIND+ROTOR 'Wind Bft 7 and Flettner rotor'  
Mom?>CURVE COS  
Mom?>MOM 157,15  
Mom?>OK
```

```
CR_I?>CRIT MAXHEEL20 'static heeling angle < 20 deg and < deck immersion  
under sailing conditions'  
Crit?>TYPE MAXHEEL  
Crit?>REQ MIN(20, FRB)  
Crit?>MOM WIND+ROTOR  
Crit?>OK
```

Für die Konfiguration mit Masten und Bäumen ergibt sich eine Lateralfäche von 507,5 m². Der vertikale Flächenschwerpunkt liegt bei 10,8 m. Der Hebelarm Z beträgt 8,73 m. Das krängende Moment bei Bft 7 ist:

$$M_W = 71,1tm \quad (2.20)$$

Unter 90° wahren Wind beträgt die Seitenkraft der Segel insgesamt 151 kN bzw. 15,39 t mit einem Moment von 291,2 tm bei einem Hebelarm von 18,9 m. Insgesamt ergibt sich ein krängendes Moment von 362,28 tm. Wie oben wird ein neues Kriterium MAXHEEL20_SAILS_BFT7_90 mit dem Moment WIND_BFT7+SAIL definiert und damit die maximale zulässige Krängung von 20° überprüft.

```
MOM, WIND_BFT7+SAIL, 'Wind Bft 7 from 90 deg and all sails set'  
CURV, COS  
MOME, 362.28  
OK
```

CRIT, MAXHEEL20_SAILS_BFT7_90, 'static heeling angle < 20 deg and < deck imm. under sails, wind from 90 deg'

TYPE, MAXHEEL

REQ, MIN(20, FRB)

MOM, WIND_BFT7+SAIL

OK

Bei Wind aus 60° entstehen wesentlich höhere Seitenkräfte durch die Segel: 239 kN bzw. 24,36 t und ein Moment von 460,4 tm. Das Windmoment reduziert mit $\sin(60^\circ)$ zu 61,57 tm. Das Gesamtmoment beträgt 522 tm. Für diesen Fall wird in NAPA das Moment WIND_BFT7_60+SAIL mit dem Kriterium MAXHEEL20_SAILS_-BFT7_60 definiert.

MOM, WIND_BFT7_60+SAIL, 'Wind Bft 7 from 60 deg and all sails set'

CURV, COS

MOME, 522

OK

CRIT, MAXHEEL20_SAILS_BFT7_60, 'heeling <20deg under sails, wind from 60deg'

TYPE, MAXHEEL

REQ, MIN(20, FRB)

MOM, WIND_BFT7_60+SAIL

OK

Für die Berechnung der Stabilität, einmal mit Hochsegeln und einmal mit Flettner-Rotoren, wurden in NAPA zwei separate Arrangements wie in Tabelle 2.1 angelegt, um dadurch sowohl die unterschiedlichen Gewichte der Segelsysteme als auch deren unterschiedliche Profile für die Windangriffsfläche berücksichtigen zu können. Nach der endgültigen Auslegung der Flettner-Rotoren in Kapitel 4.4 wurde das Profil zu PROFILE_1 angepasst, aber nicht in die Berechnungen übernommen.

Für die folgenden Beladungsfälle wurde die Intaktstabilität jeweils mit Flettner-Rotoren und Hochsegeln nachgewiesen:

- Ballast Abfahrt
- Ballast Ankunft
- Abfahrt voll beladen

Tabelle 2.1.: Zwei Konfigurationen für die Stabilitätsberechnungen in NAPA

Flettner	Hochsegel
Arrangement A	Arrangement B
Setup ARR_PLAN1	Setup ARR_PLAN2
PROFILE bzw. PROFILE_1	PROFILE2

Weitere Sonderfälle wurden überprüft:

- Abfahrt, beladen mit Containern, Flettner-Rotoren
- Ballast Abfahrt mit Forschungscontainer an Deck, Flettner-Rotoren
- Ballast Ankunft mit Forschungscontainer an Deck, Flettner-Rotoren
- Ballast Ankunft nach einer Woche mit Forschungscontainer an Deck, Hochsegel

In den Ballast-Beladungsfällen war die Einhaltung des $GM > 0,60$ m - Kriteriums und des IMOWIND-Kriteriums besonders kritisch. Mit den vorhandenen Ballastwassertanks in Verbindung mit den Füllständen für Frischwasser, Diesel, Grau- und Schwarzwasser ist es schwierig einen Zustand zu erreichen, der alle Stabilitätskriterien erfüllt. Eine mögliche Lösung ist der Einsatz von mehr Festballast. Es sind zusätzliche Kriterien für maximale Krängungswinkel bei Bft 7 definiert worden, welche unter der vollen Segelfläche nicht eingehalten werden. Die Segel müssen also vorher gerefft werden. Das Ergebnis einer Stabilitätsberechnung ist beispielhaft in Anhang A.2.3 zu sehen, die anderen Nachweise befinden sich im digitalen Projektordner.

2.6.2. Leckstabilität

Die Berechnung der Leckstabilität eines Schiffes soll darüber Auskunft geben, ob das Schiff in einem Schadensfall mit Wassereintrich eine stabile aufrechte Schwimmelage einnimmt oder kentern wird. Die Leckstabilität kann deterministisch durch gezieltes Fluten von Räumen oder probabilistisch aufgrund statistischer Schadensfälle ähnlicher Schiffe bestimmt werden. Im letzteren Fall wird die Wahrscheinlichkeit als “attained subdivision index A” bezeichnet. Der erreichte Unterteilungsindex A wird durch eine Formel für die Gesamtwahrscheinlichkeit gebildet. Dabei wird die Summe der Produkte über jeden Raum mit der Wahrscheinlichkeit, dass ein Raum geflutet wird multipliziert und so die Wahrscheinlichkeit, dass das Schiff nicht kentert oder sinkt ermittelt. In Abhängigkeit von der Bauart und Größe des Schiffes sowie der Passagieranzahl wird der Minimalwert “required subdivision index R” bestimmt (IMO, 2008). Die Leckstabilität wird eingehalten, wenn gilt:

$$A \geq R \quad (2.21)$$

Tabelle 2.2.: Beladungsfälle für die Leckstabilitätsberechnungen in NAPA: 1) Deepest subdivision draught (DS), 2) Partial subdivision draught (DP), 3) Light service draught (DL)

	T	GM	Trimm	Beladungsfall
1)	3,9	1,05	-0,224	SAILS_DEPARTURE_FULL-DRAUGHT
2)	3,56	0,61	0,353	SAILS_DEPARTURE
3)	3,06	0,6	1,027	SAILS_BALLAST_ARRIVAL
1)	3,9	1,018	0	FLETTNER_DEPARTURE_FULL-DRAUGHT
2)	3,498	1,064	0	FLETTNER_DEPARTURE
3)	3,096	0,6	1,38	FLETTNER_BALLAST_ARRIVAL

Für den Unterteilungsindex A müssen drei Beladungszustände untersucht und anschließend gewichtet werden. Aus den Beladungsfällen zur Intaktstabilität ergeben sich drei Tiefgänge, welche mit den weiteren geforderten Größen in NAPA eingegeben wurden. Tabelle 2.2 fasst die drei Beladungsfälle für die beiden Konfigurationen mit Hochsegeln und Flettner-Rotoren zusammen. Die probabilistische Leckstabilität wird für beide Konfigurationen sowohl als Frachtschiff als auch als Passagierschiff erfüllt. Die Zusammenfassungen mit den Werten der Indexe A und R sind im Anhang A.2.4 zu finden.

2.7. Freibord

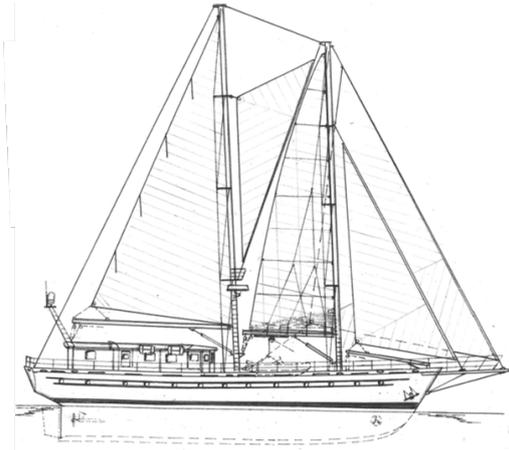
Der Freibord wurde in NAPA mit dem Freeboard manager berechnet und überprüft. Die Ergebnisse sind im Anhang A.2.5 dargestellt.

AP 3: Schiffskonstruktion

In einer Voruntersuchung wurden zunächst der Stahlbau und die Raumaufteilung von Vergleichsschiffen betrachtet. Der Stahlbau vom GreenSailer ist abweichend vom Vorentwurf nach moderneren Fertigungsweisen neu gestaltet worden. Nach der Beschreibung der neuen Stahlkonstruktion und dem Bauspantenraster wird die Modellierung in Poseidon und Siemens NX beschrieben.

3.1. Modellierung von Vergleichsschiffen

Um sich die Raumaufteilung für Fracht und Passagiere visuell vergleichend bei anderen ähnlichen Schiffen anschauen zu können, wurden sie wie der GreenSailer in NAPA und Poseidon als Voruntersuchung modelliert. Bei den Vergleichsschiffen in Abbildung 3.34 handelt es sich um ein kleineres 33-Fuß Multi-purpose vessel von Herrn Glacier, ein ähnliches noch in Planung befindliches Transportprojekt Greenheart sowie dem ehemaligen Fischkutter Amazone, der zum Passagierschiff ausgebaut worden ist. Abbildung 3.35 zeigt in der gleichen Anordnung die Linienrisse zu den Schiffen in Abbildung 3.34. Das unterschiedliche Raumkonzept und die sich grundlegend unterscheidenden Rumpfformen der beiden Schiffe Greenheart und Amazone werden in Abbildung 3.36 deutlich.



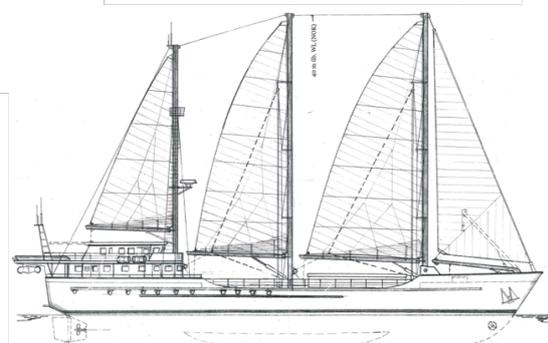
Glacier 111



Greenheart



Amazone



GreenSailer

Abbildung 3.34.: Drei ähnliche Schiffe im Vergleich zum GreenSailer

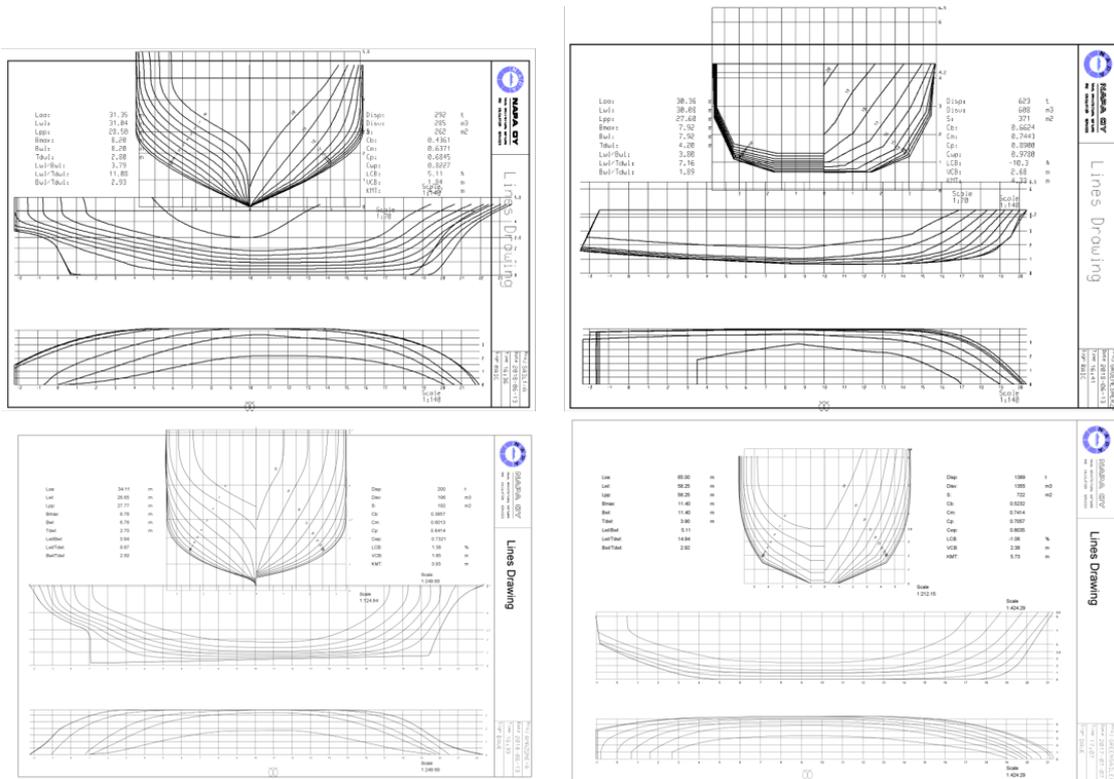


Abbildung 3.35.: Linienrisse der Vergleichsschiffe

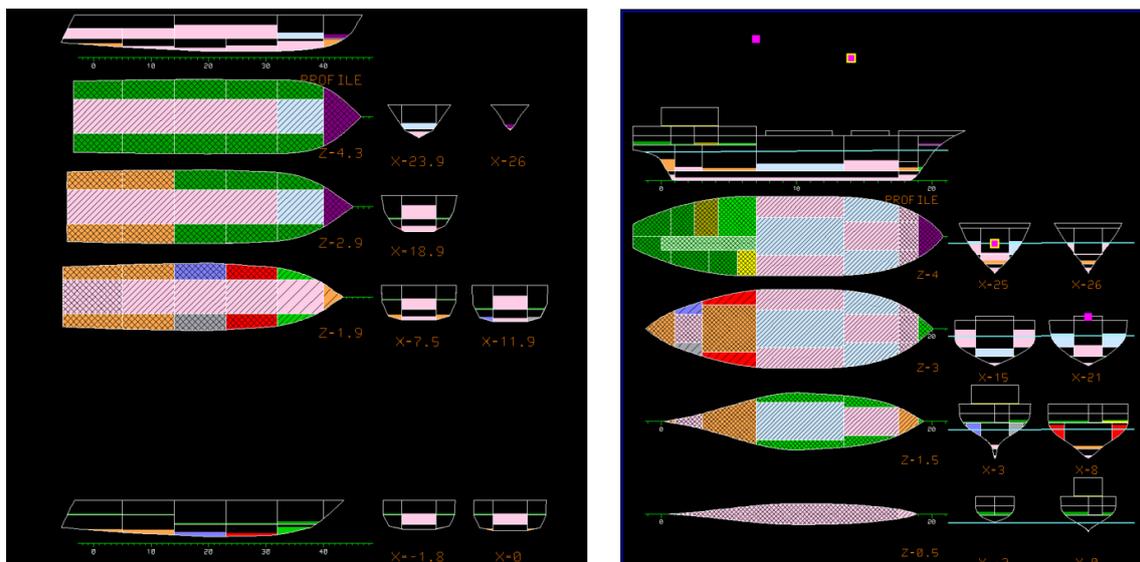


Abbildung 3.36.: Unterschiedliche Bauweise und Raumgestaltung der Schiffe Greenheart (links) und Amazone (rechts)

3.2. Ausgangsentwurf

Abbildung 3.37 zeigt den Stahlaufbau der Vergleichsschiffe Amazone und Greenheart und in der unteren Reihe einen dazugehörigen Schnitt durch den Laderaum. Rechts ist die Laderaumgestaltung mit den Stahlbauteilen aus dem ursprünglichen Entwurf von Herrn Glacer dargestellt. Alle drei Schiffe sind grundlegend verschieden aufgebaut hinsichtlich der Außenhülle, der Decksunterteilung und der Laderaumgestaltung. Greenheart z.B. ist in der Knickspantbauweise mit geraden Flächen konstruiert, was eine einfachere und kostengünstigere Fertigung ermöglicht. Der ganzheitliche ursprüngliche Entwurf von Herrn Glacer mit der alten Laderaumaufteilung ist in Abbildung 3.38 nochmal vergrößert dargestellt. Hier sind gut die wasserdichten Schotte, Decks und Spanten zu sehen.

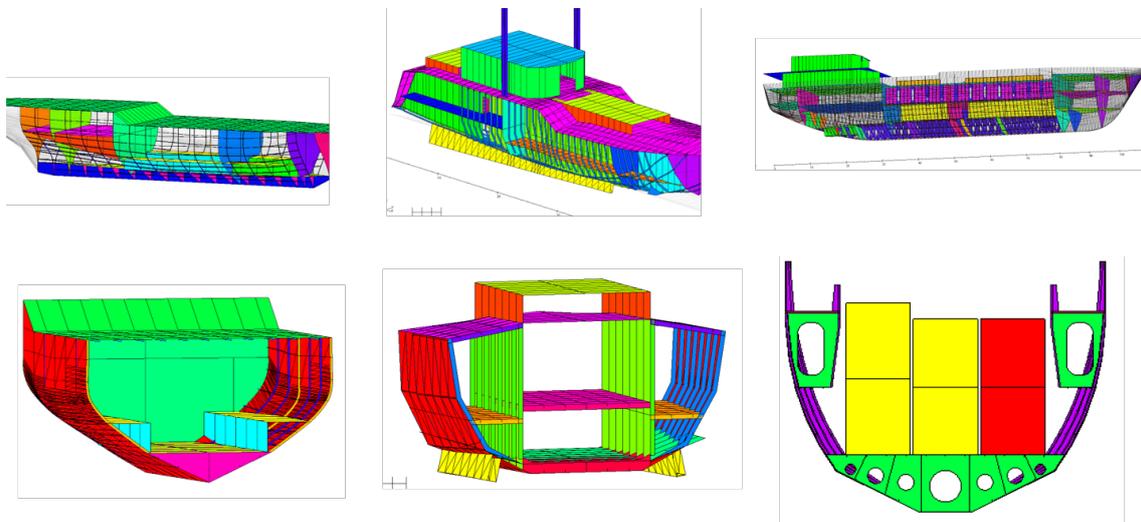


Abbildung 3.37.: Raumaufteilung und Querschnitte der Schiffe Amazone (links), Greenheart (mitte) und des ursprünglichen GreenSailers (rechts)

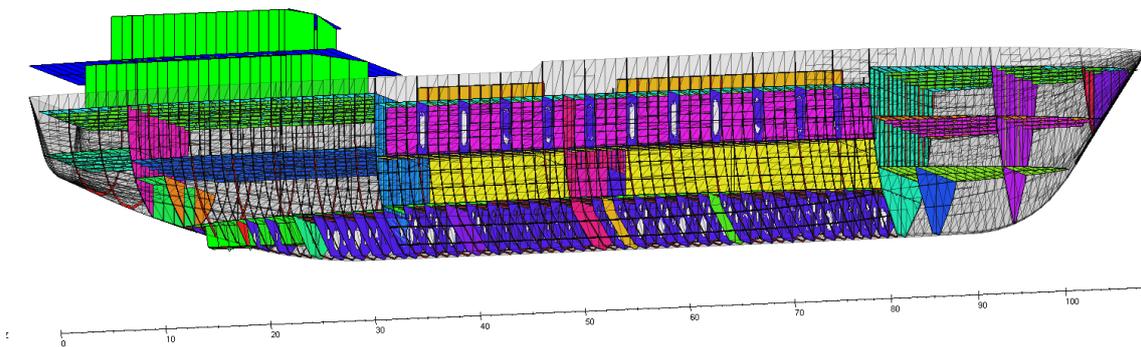


Abbildung 3.38.: Ausgangsentwurf nach Glacer

3.3. Beschreibung der Stahlkonstruktion

Für den aktuellen Entwurf wurde eine grundlegende Stahlstruktur entworfen. Daraus konnten die Stahlgewichte abgeleitet werden. Es ergab sich ein Gesamtstahlgewicht von 430 t. Das Gewicht sowie die Lage des Gewichtsschwerpunktes wurden in der Stabilitätsberechnung berücksichtigt. Sie werden in Kapitel 3.7 angegeben. Das Gesamtstahlgewicht wurde anhand weiterer Vergleichsschiffe verifiziert.

Ergebnisse und Änderungen in den AP 2 und 4 führten zu Anpassungen in diesem AP. Da es in AP2 zu einigen Modifikationen der Raumaufteilung kam, wurde fast das gesamte Stahlmodell neu aufgebaut. Daraus ergaben sich weitere Besonderheiten in der Konstruktion, welche wiederum zu Änderungen in AP2 führten. Der Detaillierungsgrad wurde deutlich erhöht und eine Dimensionierung der wesentlichen Stahlbauteile vorgenommen. Gleichzeitig wurden Verbesserungen der gesamten Konstruktionsweise gegenüber der ersten Version durchgeführt. Die Auslegung erfolgte nach Vorgaben der Klassifikationsgesellschaften. Eine detaillierte Bestimmung des Stahlgewichts und Schwerpunktes wurde vorgenommen. Dafür wurde ein eigenes geschriebenes Tool zur Beschleunigung der Iterationsschleifen verwendet. Das Auslegungsmodell wurde in ein globales Finite-Element-Modell überführt, um kritische Bereiche auf ihre Belastung hin detaillierter nachrechnen zu können; dies sind im Wesentlichen die Fundamente der Windantriebstechnik mit vergleichsweise hohen lokalen Lasten.

Abbildung 3.39 zeigt die überarbeitete Stahlstruktur im Vergleich zu Abbildung 3.38. Die Schottpositionen wurden mit der Umgestaltung der Laderäume angepasst. Im vorderen Laderaum wurden sogenannte Affenfelsen eingefügt, um Container oder Paletten im sich zuspitzenden Bugbereich besser stauen zu können. Der hintere Aufenthaltsbereich wurde zu Gunsten des Laderaums verkürzt. Dafür wurde ein zusätzliches Deck eingezogen.

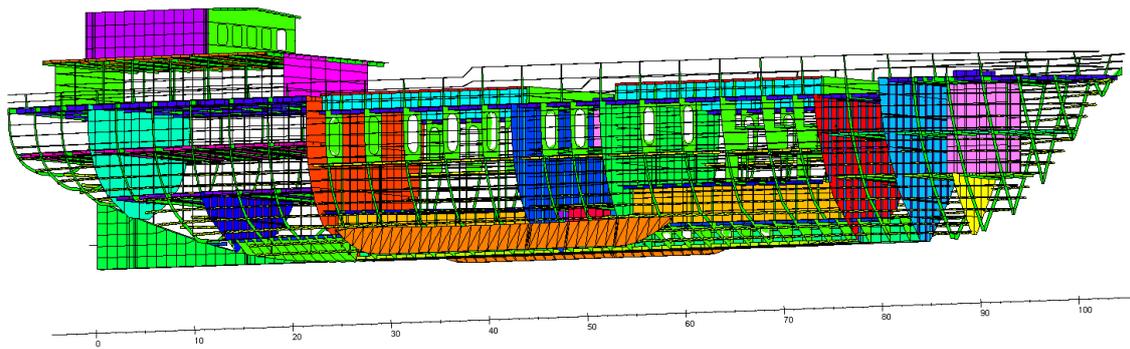


Abbildung 3.39.: Auslegungsmodell der Stahlstruktur in modifizierter Bauweise

3.4. Bauspantenraster

Die Wahl des Bauspantenrasters richtete sich im Allgemeinen u. a. nach den jeweiligen Gegebenheiten für eine möglichst effiziente Fertigung auf einer bauausführenden Werft. Da der Entwurf des GreenSailers ohne Werftbeteiligung erfolgte, gab es zunächst keine weiteren Vorgaben. Prinzipiell ergibt sich durch die Wahl eines unterschiedlichen Bauspantabstandes die Möglichkeit zwischen der Anzahl der zu fertigenden Bauteile sowie dem daraus resultierenden Stahlgewicht zu variieren. Aus Umfangsgründen wurden jedoch die Bauspantabstände nicht variiert. Generell sollte die Erzeugung der Zeichnungen nur auf ein Basic-Design und nicht auf die Ebene von Fertigungszeichnungen heruntergebrochen werden. Durch eine Optimierung wären geringfügige Einsparungen bei Baukosten bzw. dem Stahlgewicht zu erzielen, die allerdings allesamt in geringerer Größenordnung als die sonst getroffenen Festlegungen sind.

Als Mindestplattenstärke für den Rumpf wurden 8 mm (inkl. Korrosionszuschlag) vorgesehen, dünnere Platten können je nach gewählter Bauwerft schwieriger zu verarbeiten sein bzw. weisen weniger Reserve für lokale Lasten bzw. Korrosion auf. Das geringfügige Mehrgewicht durch die vorgegebene Plattenstärke wurde gegen den einfacheren Unterhalt aufgewogen.

Der Spantabstand wurde für das gesamte Schiff mit 600 mm festgelegt. Ein variierender Bauspantenabstand wäre günstiger, um z. B. Container- und Fundamentlasten besser in die Struktur abzuleiten. Allerdings ermöglicht ein einheitlicher Abstand eine einfachere Verschiebung von Bereichen und Schotten. Wie in der Bearbeitung von AP2 zu erwarten war, kam es bei der Anpassung der Räume zu solchen Verschiebungen. Insofern ermöglichte die Konstruktion hier größere Freiheiten beim Entwurf.

Da die Bau- und Rahmenspanten gut geeignet zum Ein- und Abtrag von Lasten sind,

wurde dies für den Entwurf besonders berücksichtigt. So sind insbesondere Schotte, Laschpunkte, lokale Fundamente, Aufbauten, Aufbauwände, Laderaumsüllkanten, etc. auf oder sehr dicht an die definierten Spanten gelegt worden. Wenn benötigt, konnte noch auf halbe Spantabstände ausgewichen werden. Eine Änderung des Spanttrasters sorgt für erheblichen Aufwand in der Konstruktion und wurde daher ab einem frühen Zeitpunkt vermieden. Das Bauspantenraster befindet sich als Tabelle im Anhang A.3.2.

3.5. Modellierung in Poseidon

Am Fachbereich Seefahrt und Maritime Wissenschaften wird das Dimensionierungsprogramm Poseidon der Klassifikationsgesellschaft DNVGL sowohl in der Forschung als auch in der Lehre benutzt. Es bietet einen leichten Zugang zur Erstellung schiffbaulicher Stahlstrukturen, die nach Klasseregeln ausgelegt und überprüft werden können. Außerdem besteht die Möglichkeit, erstellte Modelle in das Programm GL-Frame zu exportieren, in dem FEM-Rechnungen durchgeführt werden können. Durch die automatische Vernetzung und die Übernahme von Lasten ist diese Vorgehensweise sehr schnell und daher für viele Aufgabenstellungen, besonders in den ersten Entwurfs- und Konstruktionsschleifen, gut geeignet. Abbildung 3.40 zeigt die gewählten Plattenstärken am Hauptspant.

Im Projekt GreenSailer gab es durch die Nutzung von Windzusatzantrieben einige konstruktive Besonderheiten: So werden wesentliche Kräfte und Momente an räumlich eng begrenzten Stellen, namentlich den Fuß- bzw. Flanschpunkten der Masten, Verstagungen bzw. Flettner-Fundamenten eingebracht. Dies ist am ehesten mit einem Kranfundament zu vergleichen. Ein Beispiel für eine Lastaufbringung und die daraus resultierenden Spannungen und Verformungen ist in Abbildung 3.41 dargestellt. Das genauere Vorgehen zur Modellierung und Lastaufbringung wird im Anhang A.3.1 an einem Beispiel erläutert.

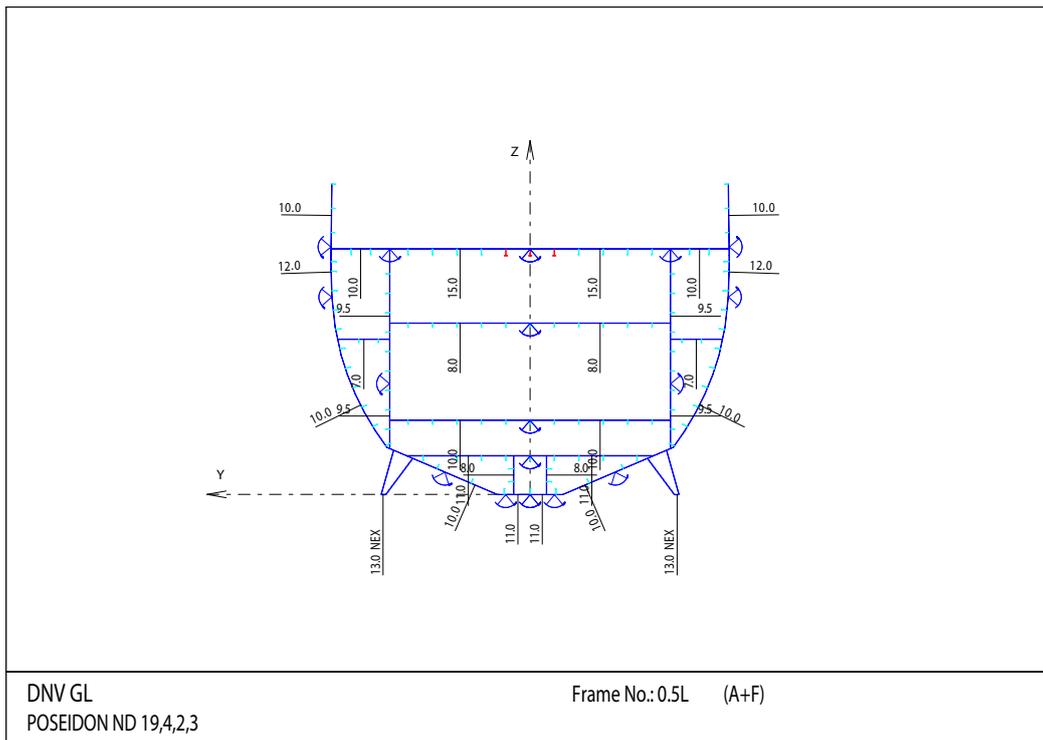


Abbildung 3.40.: Plattenstärken am Hauptspant

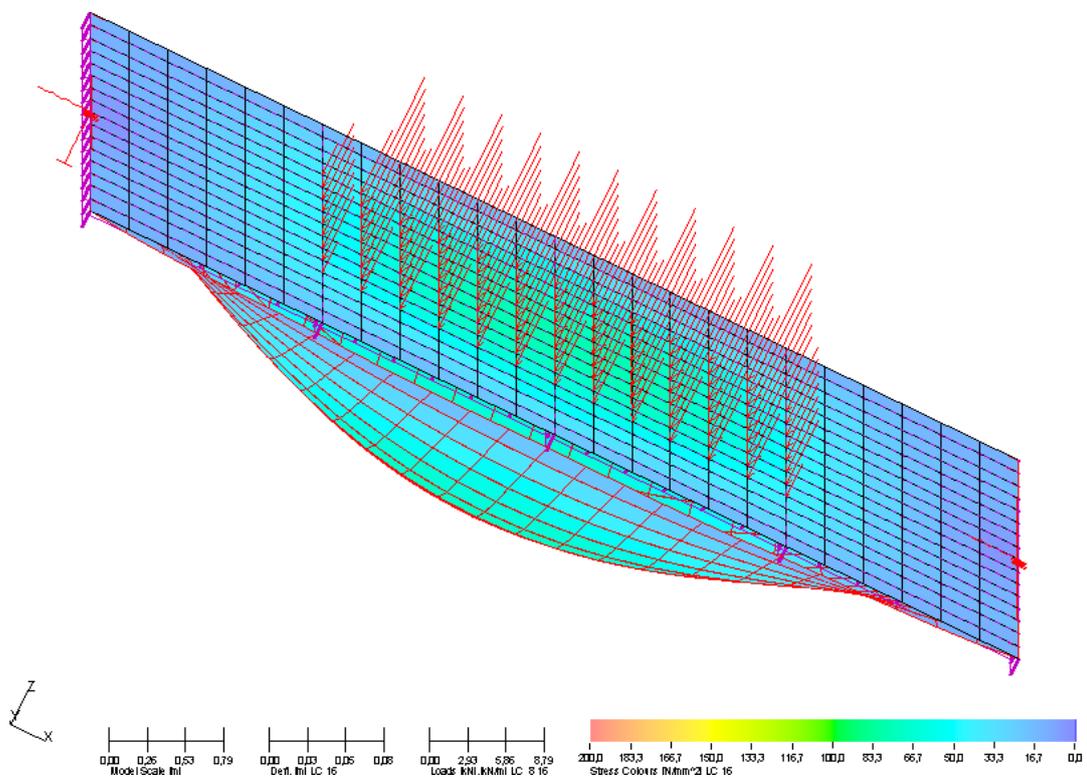


Abbildung 3.41.: Beispielhafte Spannung und Verformung eines Decks bei konstanter Lastaufbringung

3.6. Modellierung in Siemens NX

Nach der groben Stahlausrüstung, der Gewichtsabschätzung und der Betrachtung von Lastfällen in Poseidon konnte die Stahlstruktur mit der Teilebibliothek von Siemens NX weiter verfeinert und um maschinenbauliche sowie Einrichtungs-Komponenten ergänzt werden. Das Ganze geschah in der Teamcenter-Umgebung für die Verwaltung der Vielzahl an Teilen.

Für eine weitere Bearbeitung in Siemens NX musste das Modell als .igs-Datei exportiert und in ein Volumenmodell überführt werden. Im Bereich Ship Structure in NX wurde das Volumenmodell als Container festgelegt und die Schiffshülle verwendet, um darin Spanten, Decks und andere Stahlstrukturen zu definieren. Als nächstes konnten Ausrüstungsgegenstände wie Maschinenraumkomponenten importiert und im Modell mit Zwangsbedingungen in den Freiheitsgraden relativ zum Schiff positioniert werden. Einen Eindruck liefert Abbildung 3.42.

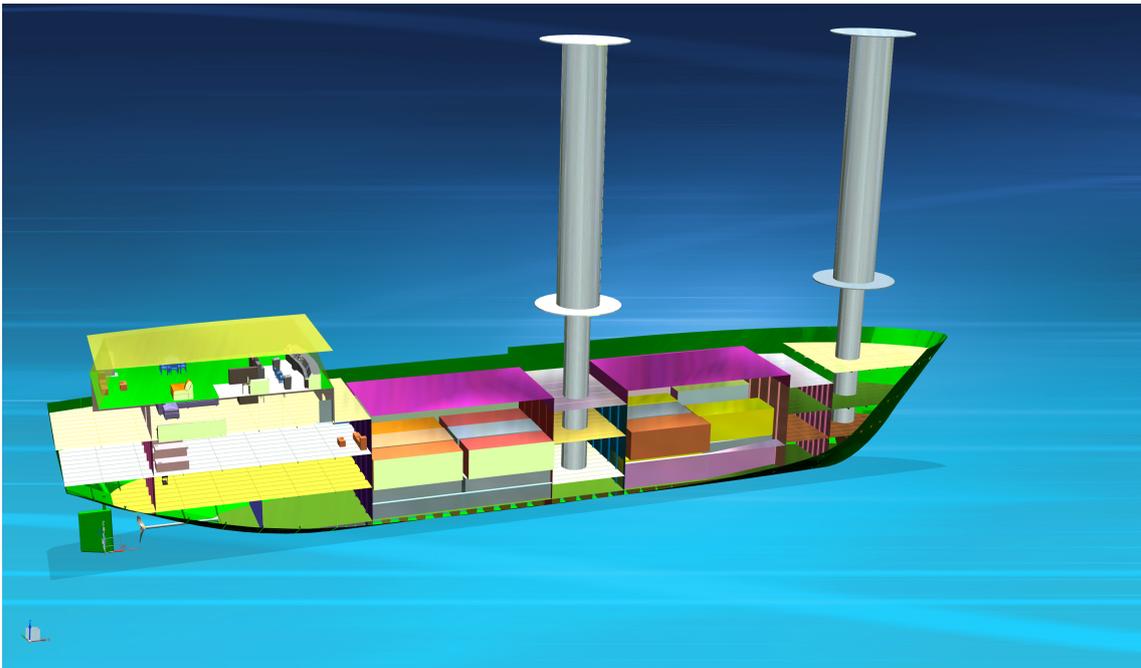


Abbildung 3.42.: Detailliertes Modell in Teamcenter

3.7. Gewichtsrechnung

Das Leergewicht des Schiffes wurde vom reinen Stahlgewicht in Poseidon ermittelt. Wie in Tabelle 3.3 wurde es in NAPA in der ELE*ELEMENTS-Tabelle mit den Koordinaten zur Lage des Gewichtsschwerpunkts für die Stabilitätsrechnung in Kapitel 2.6 definiert. Normalerweise gehört die gesamte Schiffsausrüstung zum Lightweight, sie wurde in NAPA in zusätzlichen Gewichtsgruppen pro Raum entsprechend der Lage im Schiff definiert. Die zusätzlichen angenommenen Gewichte und ihre genaue Lage im Schiff sind der beispielhaften Intaktstabilitätsrechnung im Anhang A.2.3 ab Seite 193 zu entnehmen.

Tabelle 3.3.: Lightweight

ID	Gewicht [t]	XCG [m]	YCG [m]	ZCG [m]
Lightweight (nur Stahl)	430	27,30	0	4,96

AP 4: Windantriebstechnik

Nach dem Vergleich von verschiedenen möglichen Segelantrieben wird die Bestimmung der aerodynamischen und hydrodynamischen Druckpunkte beschrieben. Es folgt die Berechnung der Segelkräfte für die Hochsegel und Flettner-Rotoren. Die anschließende Auslegung des Flettner-Rotors erfolgte unter Einhaltung des Sichtstrahls von der Brücke aus. Das Hochsegelrigg wurde mit Computational Fluid Dynamics (CFD) auf seine Umströmung und mit Finite Element Analysis (FEA) auf seine Festigkeit hin untersucht.

4.1. Vergleich von Segelantrieben

Zunächst wurden verschiedene innovative Segelantriebe in Tabelle 4.4 vergleichend gegenübergestellt. Für die weitere Betrachtung und Auslegung im Projekt wurden zwei davon ausgewählt: das Hochsegel als klassischer und robuster Windantrieb sowie der Flettner-Rotor als bereits erprobter und ebenfalls zuverlässiger Windzusatzantrieb.

Ein Nachteil der herkömmlichen Riggs ist, dass sie seitlich verstagt werden müssen, sodass die Segel nur bis zu den Wanten hin geöffnet werden können, das sind jeweils ca. 30° von Mittschiffs aus nach backbord und steuerbord. Durch die Verstägung kann auch die Beladung behindert werden. Hierbei könnte ein A-Mast von Vorteil sein. Bei den freistehenden Systemen dagegen müssen sämtliche Kräfte über den Mast und dessen Lager in das Schiff eingebracht werden.

Jedes System besitzt eigene Segeleigenschaften und hat bei bestimmten Kursen zum Wind Vorteile gegenüber anderen Systemen. Daher spielt nicht nur die Länge der Fahrtzeit, sondern vor allem die Fahrtrichtung mit den vorherrschenden Winden eine entscheidende Rolle bei der Wahl des Segelsystems. Bei der Entscheidung können Polardiagramme wie in den Abbildungen 4.48 und 4.47 mit einem Vergleich der verschiedenen Systeme helfen.

Tabelle 4.4.: Vergleich von Segelantrieben

Segelantrieb	Vorteile	Nachteile
Hochsegel	- Simple Design, keine „neue“ Technologie außer bei der Automatisierung notwendig	- Der Windangriffspunkt liegt relativ weit unten, wo die Umströmung durch den Rumpf und Aufbauten gestört wird.
Gaffelsegel	- Simple Design, keine „neue“ Technologie außer bei der Automatisierung notwendig	- Die Gaffel muss zusätzlich bewegt werden.
Indosail	- Volle Ausnutzung der möglichen Segelfläche	- Das Rollsystem am oberen Ende ist schwer zu warten.
Dyna-Rigg	- Freistehende Masten ohne Wanten, keine Behinderung der Ladevorgänge - Durch eine geschlossene Segelfläche effektiver als herkömmliche Rahsegel	- Teure Materialkosten im Vergleich zu den anderen Systemen
Wing Sail	- Die resultierende Kraft gegenüber einem Tuchsegel von gleicher Größe ist deutlich höher.	- Je nach Typ nicht reffbar
Flettner-Rotor	- Die resultierende Kraft gegenüber einem Tuchsegel von gleicher Größe ist deutlich höher.	- Auftretende Schwingungen müssen vermieden werden. - Kein ästhetisches Aussehen eines Segelschiffes
Suction Wing	- Die resultierende Kraft gegenüber einem Tuchsegel von gleicher Größe ist deutlich höher.	- Kein ästhetisches Aussehen eines Segelschiffes
Zugdrachen	- Der Platzbedarf an Deck ist auf den Bug beschränkt.	- Nur Fahrten vor dem Wind möglich - Das System zum Starten und Landen des Drachens ist noch nicht ausgereift. - Das Material des Drachens ist anfällig für Beschädigungen und muss repariert werden. - Absturzrisiko - Betrieb im Küstenmeer aus flugrechtlichen Gründen problematisch

4.2. Berechnung der Druckpunkte

Für ein ausgeglichenes Momentenverhältnis mussten die Lage des Segeldruckpunkts bzw. des gesamten Riggs und die Lage des Unterwasserdruckpunkts am Rumpf bestimmt werden.

4.2.1. Bestimmung des Segeldruckpunkts

Der Segeldruckpunkt kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Nach der Methode von Scharping (1994) werden die Segel in einzelne Dreiecke und Ellipsen unterteilt und jeweils der geometrische Flächenschwerpunkt bestimmt. Im späteren Verlauf des Projekts wurden die ursprünglich von Glacer vorgesehenen Segel in ihrer Form leicht verändert. Fläche und Druckpunkt sind dann durch eine Simpson-Integration bestimmt worden. Das Ergebnis der Flächen- und Druckpunkt-lagenbestimmung ist in den Tabellen 4.5 und 4.6 zusammengefasst. Dabei sind XL der horizontale Abstand des Flächenschwerpunktes zum hinteren Lot (AP), XH der vertikale Abstand zur Design-Wasserlinie (3,9 m), MXL und MXH das horizontale und vertikale Flächenmoment. Das Flächenmoment jeder Einzelfläche eines Segels wird aus der Multiplikation von Fläche und Abstand gebildet. Nach der Aufsummierung aller Flächen und Momente kann wiederum das Gesamtmoment durch die Gesamtfläche geteilt werden, um den horizontalen bzw. vertikalen Abstand des Flächenschwerpunktes des gesamten Segels zu erhalten. Für die Bestimmung des Flächenschwerpunktes des gesamten Riggs bestehend aus den einzelnen Segeln wird genauso verfahren. Für eine weitgehend automatische Berechnung des Flächenschwerpunkts eines Segels wurde eine Methode entwickelt, welche nur wenige Hauptparameter des Segels als Eingangsgröße braucht. Sie ist im Anhang A.4.1 beschrieben.

In der Realität entspricht der Flächenschwerpunkt jedoch nicht dem Segeldruckpunkt. Die Druckverteilung eines Profils führt dazu, dass der Segeldruckpunkt etwa bei 35 % der Sehnenlänge des angestellten Segels liegen. Somit liegt der Segeldruck-

Tabelle 4.5.: Segelabmessungen

Segel	Höhe [m]	Breite [m]	Fläche [m ²]	Fläche [%]
Besan	23,07	10,62	136	15,13
Groß	30,50	13,20	286	31,81
Fock	31,00	14,80	331	36,82
Vorsegel	29,30	9,90	146	16,24
Summe Segel			899	100

Tabelle 4.6.: Geometrische Lage der Lateraldruckpunkte (Flächenschwerpunkte)

Segel	XL [m]	MXL [m ³]	XH [m]	MXH [m ³]
Besan	9,83	1338	19,64	2673
Groß	25,18	7204	20,17	5770
Fock	42,33	14016	20,37	6745
Vorsegel	53,36	7816	16,46	2410
Summe Segel	33,76	30374	19,56	17599

punkt etwas weiter vorne als den Flächenschwerpunkt. Zudem wandert der Segel-
druckpunkt mit verändertem Segelanstellwinkel nach hinten aus.

4.2.2. Bestimmung des Lateraldruckpunkts des Rumpfes

Der Rumpf des GreenSailers ist am Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST) in Duisburg im Maßstab 1:22 nachgebaut und bei verschiedenen Geschwindigkeiten, Drift- und Krängungswinkeln sowie im regulären und irregulären Seegang geschleppt worden. Abbildung 4.43 zeigt die Lage des lateralen Druckpunkts des Rumpfes unter verschiedenen Driftwinkeln mit zunehmender Geschwindigkeit. Der Lateraldruckpunkt wanderte mit zunehmender Geschwindigkeit nach vorne hin aus, wobei er sich bei ca. 75 % der Länge der Wasserlinie (LWL) stabilisiert. Er war dabei nahezu unabhängig vom Driftwinkel. Bei zusätzlicher Krängung (Abbildung 4.44) lag der Druckpunkt im gleichen Feld, jedoch ca. 5 % weiter vorne. Die Streuung ist dabei gering. Für weitere Berechnungen wurde angenommen, dass der Lateraldruckpunkt des Rumpfes bei 75 % LWL bzw. bei 43,625 m vom Aft Peak aus liegt. Es wurde deutlich, dass der Lateraldruckpunkt nicht dem geometrisch ermittelten Flächenschwerpunkt entsprach. Die Differenz von Segel- und Lateraldruckpunkt betrug somit 9,87 m bzw. 16,9 % bezogen auf LWL. Das Schiff ist somit luvgerig und bestrebt, in den Wind zu drehen. Daher sind kleinere Ruderwinkel notwendig, um das Schiff auf Kurs zu halten, was einen geringen zusätzlichen Ruderwiderstand bedeutet. Bei Windstärke 3-4 sollten die Druckpunkte so auswandern, dass sie übereinander liegen und ein ausgeglichenes Segeln ermöglicht wird. Mit zunehmender Geschwindigkeit sollte das Schiff luvgerig werden, um stets von selbst an den Wind zu gehen. Bei weiterer Leegierigkeit würde das Schiff abfallen und an Höhe verlieren. Zudem vergrößert sich der Driftwinkel.

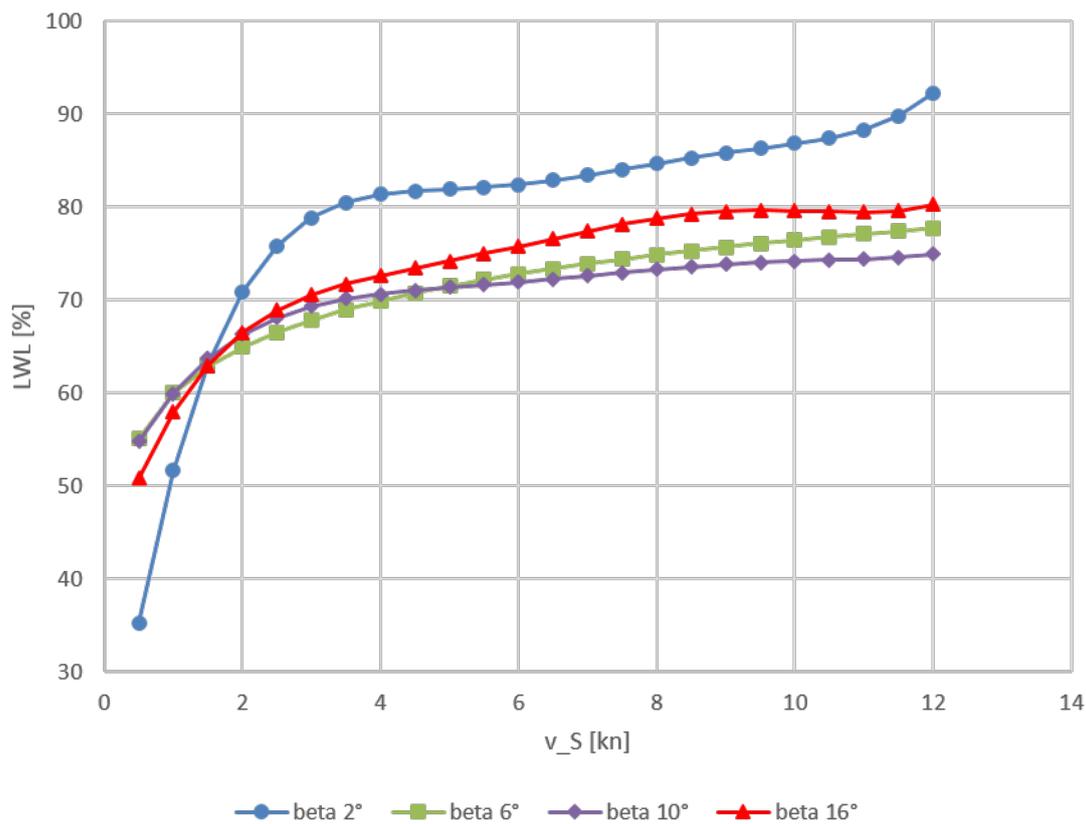


Abbildung 4.43.: Lateraldruckpunkt bei Drift

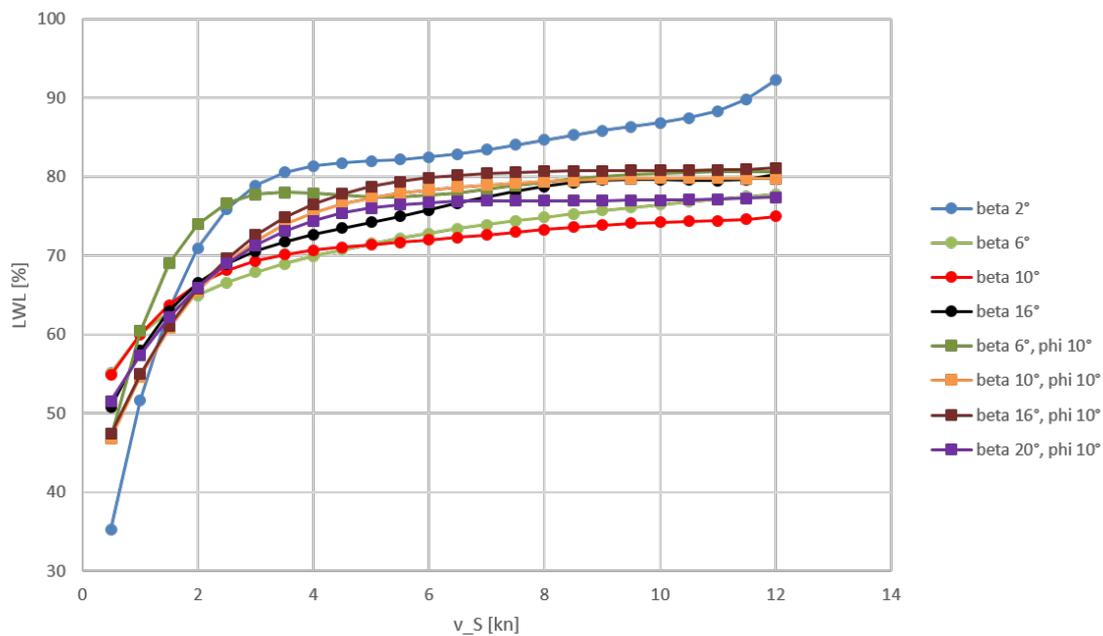


Abbildung 4.44.: Lateraldruckpunkt bei Drift und Krängung

4.3. Berechnung der Segelkräfte

Bei der Fahrt durchs Wasser addieren sich die Schiffsgeschwindigkeit v_S und die Windgeschwindigkeit v_W zum scheinbaren Wind mit der scheinbaren Windgeschwindigkeit v_A . Diese bildet gleichzeitig die Anströmgeschwindigkeit des Segelsystems, unter dem Winkel γ_A bezogen auf den Kurs über Grund.

Zunächst sind die Richtung des wahren Windes γ_W und der Schiffskurs ϑ auf rechtweisend Nord bezogen. Der Winkel des scheinbaren Windes kann mithilfe des kartesischen Koordinatensystems berechnet werden. Daher wurden zunächst die Geschwindigkeiten des wahren Windes und des Schiffes in kartesischen Koordinaten ausgedrückt:

$$v_{Wx} = v_W \cdot \sin(\gamma_W) \quad (4.22)$$

$$v_{Wy} = v_W \cdot \cos(\gamma_W)$$

$$v_{Sx} = v_S \cdot \sin(\vartheta) \quad (4.23)$$

$$v_{Sy} = v_S \cdot \cos(\vartheta)$$

Die jeweiligen Vektoren wurden addiert und man erhielt die scheinbare Windgeschwindigkeit v_A :

$$v_{Ax} = v_{Wx} + v_{Sx}$$

$$v_{Ay} = v_{Wy} + v_{Sy} \quad (4.24)$$

$$v_A = \sqrt{(v_{Ax}^2 + v_{Ay}^2)}$$

Der Winkel des scheinbaren Windes bezogen auf Norden ist θ und berechnet sich wie folgt:

$$\text{If } v_{Ax} \geq 0 : \theta = \arccos(v_{Ay}/v_A) \quad (4.25)$$

$$\text{else } \theta = 2\pi - \arccos(v_{Ay}/v_A)$$

Die Kräfte am Segel werden mit dem Winkel des scheinbaren Windes bezogen auf den Kurs über Grund (γ_A) berechnet. Dieser entspricht der Bewegungsrichtung des Schiffes:

$$\gamma_A = \max(\theta, \vartheta) - \min(\theta, \vartheta) \quad (4.26)$$

$$\text{If } \gamma_a > 180 : \gamma_a = 360 - \gamma_a$$

Wie in Abbildung 4.45 A gezeigt, produziert ein Segel eine Auftriebskraft F_L senkrecht zur Anströmung und eine Widerstandskraft F_D parallel zu ihr:

$$F_L = c_L \frac{\rho_A}{2} v_A^2 A_S \quad (4.27)$$

$$F_D = c_D \frac{\rho_A}{2} v_A^2 A_S$$

wobei c_L und c_D die Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten des Segels in Abhän-

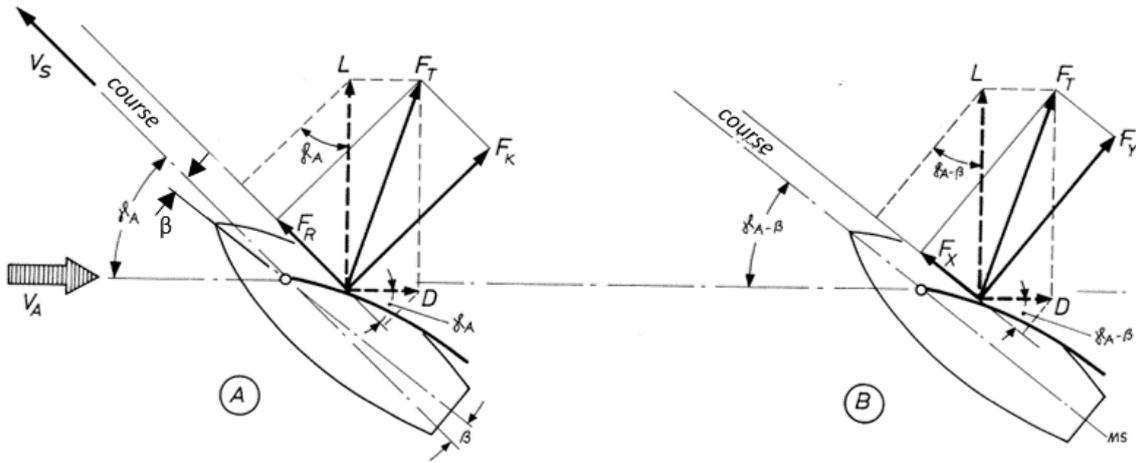


Abbildung 4.45.: Aerodynamische Kräfte (Marchaj, 1991)

gigkeit zum Anströmwinkel α sind. Es ist der Segelstellwinkel relativ zum Winkel des scheinbaren Windes bezogen auf Kurs über Grund. A_S ist die Segelfläche und ρ_A ist die Dichte der Luft. Die Auftriebs- und Widerstandskraft zusammen ergeben die Gesamtkraft F_T , welche wie in Abbildung 4.45 A bezogen auf Kurs über Grund in eine Vorwärtskraft F_R und in eine Seitenkraft F_K aufgeteilt werden kann:

$$\begin{aligned} F_R &= F_L \cdot \sin(\gamma_A) - F_D \cdot \cos(\gamma_A) \\ F_K &= F_L \cdot \cos(\gamma_A) + F_D \cdot \sin(\gamma_A) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Die aerodynamischen Kräfte werden durch hydrodynamische Kräfte am Rumpf ausgeglichen. Um die hydrodynamische Ausgleichskraft generieren zu können, dreht sich das Schiff um seine Gierachse, sodass ein Anströmwinkel entsteht, welcher gleich dem Driftwinkel β ist (van der Kolk u.a., 2016). Der Driftwinkel muss bei der Bestimmung der Vorwärtskraft F_X der Segel und der krängenden Kraft F_Y im Schiffs-Koordinatensystem mit einbezogen werden. Die feine Unterscheidung wird in Abbildung 4.45 A und B gezeigt, wo Segelvortriebskraft F_R in Kursrichtung zeigt, wohingegen die Vorwärtskraft F_X parallel zur Schiffslängsachse gerichtet ist.

$$\begin{aligned} F_X &= F_L \cdot \sin(\gamma_A - \beta) - F_D \cdot \cos(\gamma_A - \beta) \\ F_Y &= F_L \cdot \cos(\gamma_A - \beta) + F_D \cdot \sin(\gamma_A - \beta) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Der Gesamtwiderstand R_{TS} des Schiffes wird durch die Segelvortriebskraft F_R überwunden.

Die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte in Gleichung 4.27 in Abhängigkeit zum Anströmwinkel α für ein Hochsegel mit einem Flächenverhältnis von 3,1 stammen

von (Marchaj, 1997, S. 97):

$$\begin{aligned}
 c_L &= -2.77020582384671E - 09 \alpha^5 + 3.02374387204708E - 06 \alpha^4 \\
 &\quad - 0.000272033678560666 \alpha^3 + 0.00730603911934099 \alpha^2 \\
 &\quad - 0.0237809014292648 \alpha + 0.39514229229896 \\
 c_D &= 4.16097182382412E - 09 \alpha^5 - 7.3459791125345E - 07 \alpha^4 \\
 &\quad + 0.0000275035944816456 \alpha^3 + 0.000222072184822021 \alpha^2 \\
 &\quad - 0.00107049262172499 \alpha + 0.0969838257213261
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Die gesamte Segelfläche von 890 m² wurde vereinfacht als ein großes Segel behandelt. In der Realität haben die einzelnen Segel unterschiedlich große Flächenverhältnisse und beeinflussen sich gegenseitig. Es wurde ferner angenommen, dass sich die Segel nur 60° von Mittschiffs auslenken lassen, bis sie an die Wanten stoßen. Für Segelstellungen darüber hinaus (achterlicher Wind) wurde der Vortriebsbeiwert c_R (Marchaj, 1997, S. 165) für ein Hochsegel mit einem Flächenverhältnis von 3 angenommen, wobei das Segel im Modellversuch bis 90° von Mittschiffs geöffnet wurde. Es wurde angenommen, dass der Driftwinkel bei Wind von achtern null ist. So konnte die Segelvortriebskraft F_R direkt wie in Gleichung 4.28 ausgerechnet werden.

$$\begin{aligned}
 c_R &= -3.03614962520864E - 12 \gamma_A^6 + 1.82178900510314E - 09 \gamma_A^5 \\
 &\quad - 4.14239774900538E - 07 \gamma_A^4 + 0.0000446601912858889 \gamma_A^3 \\
 &\quad - 0.00243579619810059 \gamma_A^2 + 0.079332008927304 \gamma_A - 0.715460029403332
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

Für einen Flettner-Rotor wurden die Modellversuchswerte des Eco-Flettners der Hochschule Emden/Leer in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl λ genommen:

$$\begin{aligned}
 c_L &= 0.0280512820511944 \lambda^5 - 0.287237762235236 \lambda^4 + 0.695670163157047 \lambda^3 \\
 &\quad + 0.643837412677385 \lambda^2 - 0.0236777392674412 \lambda + 0.0311713294724996 \\
 c_D &= 0.0200512820512557 \lambda^5 - 0.267564102563256 \lambda^4 + 1.14706876456421 \lambda^3 \\
 &\quad - 1.42919289040947 \lambda^2 + 0.125581002203944 \lambda + 0.547185314978606
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

Für das GreenSailer-Projekt wurden bei DST Modellversuche unter Drift und Krängung bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Aus den Ergebnissen ließen sich die beiden Gleichungen (4.33) und (4.34) ableiten (Friedhoff u. Tenzer, 2018). Die erste Gleichung beschreibt die Schiffsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zu Driftwinkel und Schleppwiderstand R_{TS} bezogen auf Kurs über Grund. Dieser ist gleich der Segelvortriebskraft F_R . Mit der zweiten Gleichung kann der Driftwinkel in Ab-

Tabelle 4.7.: Koeffizienten für die Schiffsgeschwindigkeit und den Driftwinkel (Friedhoff u. Tenzer, 2018)

	GreenSailer	Fehn Pollux allgemein	Fehn Pollux bei 6 kn	Fehn Pollux bei 10 kn
a_1	2.8252890972	1.0326845366	1.0326845366	1.0326845366
a_2	0.3302163808	0.5004196909	0.5004196909	0.5004196909
a_3	0.0	-0.0001498546	-0.0001498546	-0.0001498546
a_4	0.0000656145	0.0027575432	0.0027575432	0.0027575432
a_5	-0.0012495249	-0.0150678477	-0.0150678477	-0.0150678477
a_6	0.0034733975	0.0173039766	0.0173039766	0.0173039766
a_7	1.0003970599	0.0173039766	0.0173039766	0.0173039766
b_1	-0.0000082315	-0.0000282823	-0.0003011571	-0.0000391602
b_2	0.0299796869	0.0362943605	0.1197607734	0.0420282445
b_3	0.0	0.0	-0.4808542526	-0.6101992799
b_4	.0481464436	0.0479557658	0.0206245502	0.0546611223
b_5	-1.2635426102	-1.1100438661	-0.4851235435	-1.2857200326
b_6	9.2228813037	7.3093540703	3.1682574536	8.3968138245

hängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit und der Seitenkraft F_Y berechnet werden.

$$v_S = a_1 \cdot F_R^{a_2} \cdot (a_3 \cdot \beta^4 + a_4 \cdot \beta^3 + a_5 \cdot \beta^2 + a_6 \cdot \beta^1 + a_7 \cdot \beta^0) \quad (4.33)$$

$$\beta = (b_1 \cdot F_Y^2 + b_2 \cdot F_Y^1 + b_3 \cdot F_Y^0) \cdot (b_4 \cdot v_S^2 + b_5 \cdot v_S^1 + b_6 \cdot v_S^0) \quad (4.34)$$

Die Koeffizienten für die beiden Formeln sind in Tabelle 4.7 angegeben. In einem anderen Projekt ist der Rumpf des Mehrzweckfrachters Fehn Pollux untersucht worden, der mit einem Flettner-Rotor ausgestattet worden ist. Dessen Versuchsergebnisse wurden in einer vergleichenden Studie von Elger u. a. (2020) verwendet. Für die Berechnung des Driftwinkels bei 6 und 10 kn wurde eine genauere Formel abgeleitet. Die Koeffizienten sind nur für den Rumpf des GreenSailers und den der Fehn Pollux gültig.

Um für eine bestimmte Windgeschwindigkeit und -richtung die größtmögliche Schiffsgeschwindigkeit zu bestimmen, wurde der Anstellwinkel der Segel von 0-40° bzw. die Schnelllaufzahl von 0-6 variiert. Zunächst wurden die Schiffsgeschwindigkeit v_S und die Krängungskraft F_Y ohne Driftwinkel berechnet. Hieraus konnte der Driftwinkel berechnet werden, was zu einer Verringerung der Schiffsgeschwindigkeit führte. v_S und F_Y wurden so lange neu berechnet, bis die Änderung im Driftwinkel weniger als ein Grad betrug. Mit der Änderung der Schiffsgeschwindigkeit änderten sich auch Richtung und Stärke des scheinbaren Windes, was zu einer veränderten Anströmung der Segel führte. Der iterative Prozess wurde fortgeführt, bis sich die Schiffsgeschwin-

digkeit nicht mehr ändern und ein Kräftegleichgewicht gefunden worden ist. Die erforderlichen Iterationsschleifen im Programm sind im Ablaufdiagramm in Abbildung 4.46 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung zur Berechnung von Drift- und Ruderwinkel sowie deren Widerstände ist in Elger u. a. (2020) zu finden.

Für die Berechnung des krängenden Momentes M_Y wurde der Abstand zwischen dem Auftriebsschwerpunkt und dem Segeldruckpunkt als Hebelarm angenommen. Für kleine Winkel ergibt sich der Krängungswinkel φ :

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{M_Y}{GM\rho g\nabla}\right) \quad (4.35)$$

Die zu erwartende Schiffsgeschwindigkeit mit einem Hochsegelrigg bestehend aus 890 m² Segelfläche oder zwei großen Flettner-Rotoren bei 6 kn Wind aus verschiedenen Richtungen (wahrer Wind) ist im Polardiagramm in Abbildung 4.47 dargestellt. Da die Beiwertkurve keine größeren Anstellwinkel enthielt, wurden für Winde ab 140° Segelbeiwerte eines ähnlichen Segels aus einem anderen Versuch genommen (vgl. Marchaj), dessen Segelauslenkung betrug jedoch vor dem Wind bis zu 90°.

Der max. Auftrieb des Segels liegt in der Beiwertkurve bei 30° Anstellwinkel. Jedoch liegt das Vortriebs-Optimum bei immer kleineren Anströmwinden je höher die Amwindkurse sind. Dies ist damit zu erklären, dass mit geringerem Anstellwinkel auch der Widerstand geringer wird. Auftrieb und Widerstand müssen vektoriell gemeinsam betrachtet werden. Aus Abbildung 4.45 lässt sich ableiten, dass mit kleineren Anstellwinkeln der Widerstand reduziert wird. Dadurch wandert der Vektor der Gesamtkraft F_T weiter nach vorne und die Vortriebskraft F_R nimmt zu.

In Abbildung 4.47 sind der Drift- und Ruderwiderstand nicht berücksichtigt worden. Ein Polardiagramm mit der zu erwartenden Schiffsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung von Drift- und Ruderwinkeln bei drei verschiedenen Windstärken und zusätzlich zwei kleinen Flettner-Rotoren ist im Anhang A.4.2 abgebildet. Ein ähnliches Diagramm ergibt sich für die Vorwärtskräfte in Abbildung 4.48. Es ist deutlich zu sehen, dass zwei Drittel mehr Kraft nötig ist, um das Schiff in Abbildung 4.47 im oberen Geschwindigkeitsbereich nur zwei Knoten schneller fahren zu lassen.

Ein Vergleich der maximal erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung von Drift- und Ruderwiderstand basierend auf den selben Daten wie das Polardiagramm im Anhang A.4.2 ergibt in Abbildung 4.49, dass die Hochsegel und zwei kleine Flettner-Rotoren bei gleichen Windverhältnissen ähnlich gut sind. Zwei größere Rotoren würden den GreenSailer 1-2 kn schneller fahren lassen, allerdings sind die großen Rotoren wesentlich schwerer. Dies würde sich negativ auf die Zula-

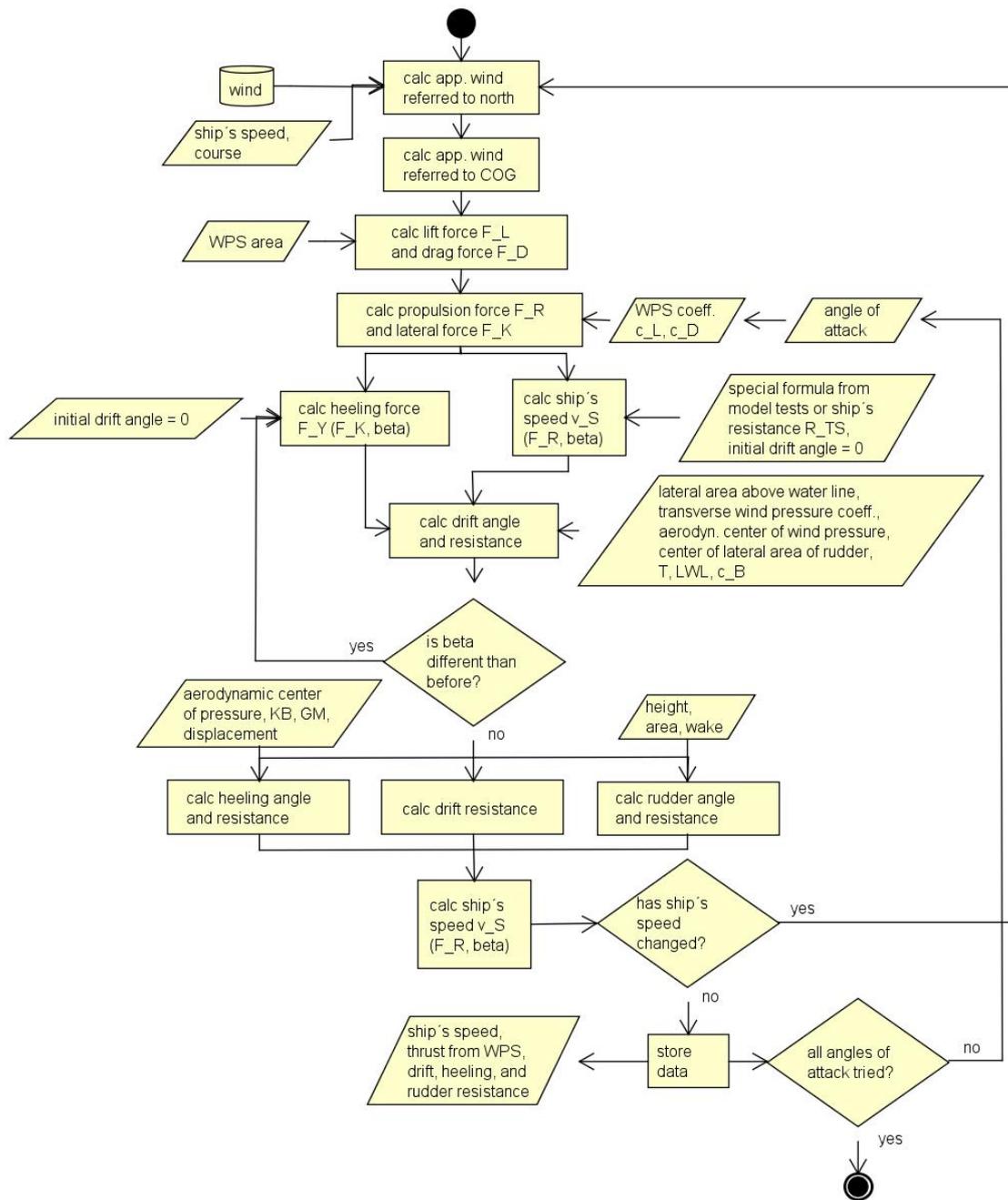


Abbildung 4.46.: Iterationsschema zur Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit (Elger u. a., 2020)

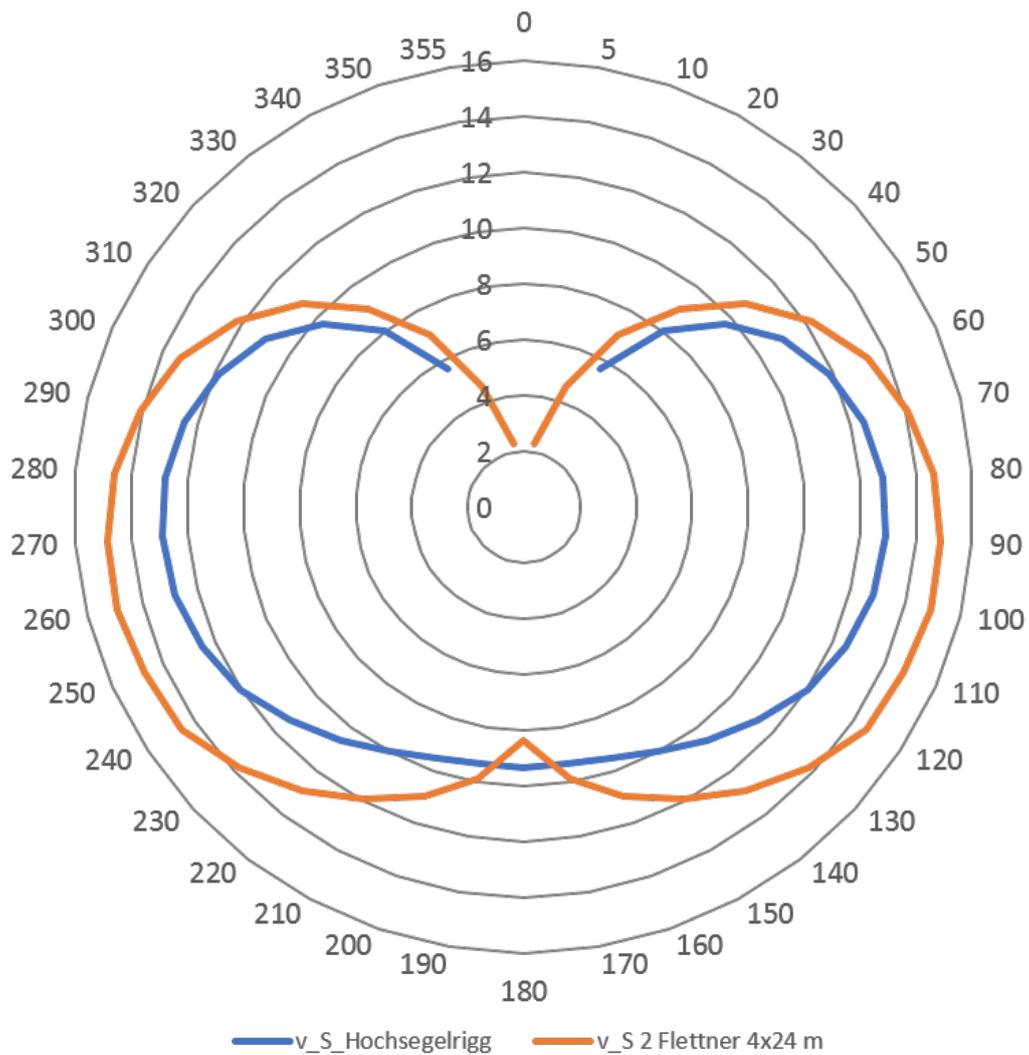


Abbildung 4.47.: Zu erwartende Geschwindigkeit des GreenSailers in kn bei 6 Bft Wind, ohne Berücksichtigung von Drift- und Ruderwiderstand

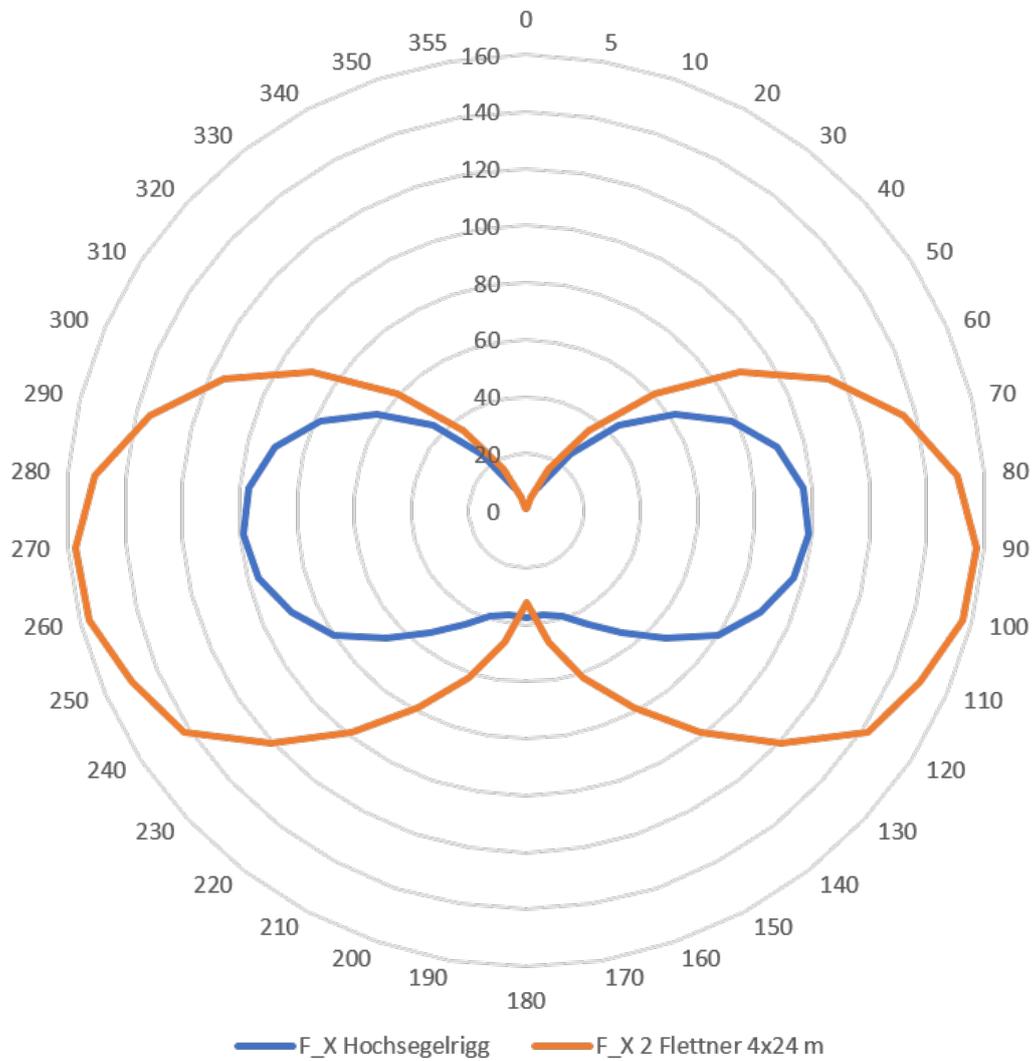


Abbildung 4.48.: Vorwärtskraft eines Hochsegelriggs oder von zwei großen Flettner-Rotoren in kN bei wahren Wind aus verschiedenen Richtungen

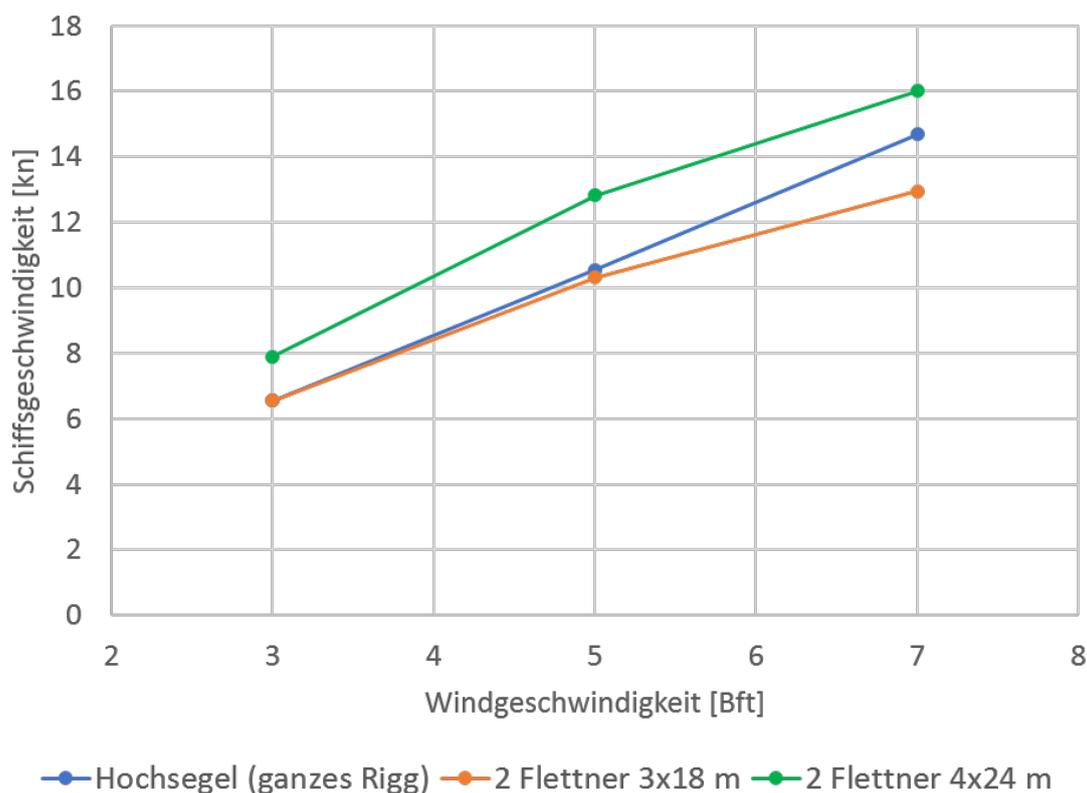


Abbildung 4.49.: Maximal erreichbare Schiffsgeschwindigkeit mit einem Hochsegel-Rigg oder Flettner-Rotoren

dung und die Stabilität des Schiffes auswirken. Daher wurde entschieden, den Entwurf so zu gestalten, dass wahlweise ein Segelrigg oder zwei kleine Flettner-Rotoren installiert werden können. Mit zwei kleineren Rotoren lassen sich zwei Meter zusätzlicher Laderaum gewinnen. Anzumerken ist, dass die Rotoren insbesondere bei kleinen Windgeschwindigkeiten noch mehr Kraft erzeugen könnten, wenn die für die Berechnung verwendete maximale Leistung von 260 kW des antreibenden E-Motors erhöht wurde. Abbildung 4.49 macht deutlich, dass schon bei geringen Windstärken akzeptable Fahrtgeschwindigkeiten erreicht wurden.

Für die Auslegung der Fundamente der Flettner-Rotoren bzw. die Decksdurchführung der Masten wurden die maximal zu erwartenden Kräfte bei 7 Bft bestimmt. Die erste Zeile in Tabelle 4.8 führt die Kräfte des gesamten Riggs auf. Die maximale Vortriebskraft F_X tritt bei scheinbarem Wind aus 64° auf. Die maximale Seitenkraft F_Y und die Kraft des Gesamtvektors F_T wurden bei 43° erreicht. Es muss erwähnt werden, dass sämtliche Berechnungen mit den Beiwerten eines einzelnen Hochsegels aus Gleichung 4.32 durchgeführt wurden. Es wurde somit angenommen, dass alle Segel das gleiche Flächenverhältnis haben und sich in der Anströmung gegenseitig nicht beeinflussen. Richtiger wäre gewesen, die Beiwerte für ein gesamtes Rigg von

Tabelle 4.8.: Maximal auftretende Kräfte bei 7 Bft

Segel	F_X [kN]	F_Y [kN]	F_T [kN]	M_X [kNm]	M_Y [kNm]
Gesamtes Rigg	151	239	258		
Besan	22,8	36,2	39	363,4	577
Groß	48	76	82,1	790,6	1251,7
Fock	55,6	88	95	926,9	1467
Vorsegel	24,5	38,8	41,9	312,6	495,1
Flettner hinten	51	55		683,4	737
Flettner vorne	51	55		591,6	638

Schenzle (2018) zu nehmen. In den darauf folgenden Zeilen in Tabelle 4.8 wurden die Kräfte der Fläche entsprechend prozentual auf die Segel aufgeteilt. Die Kräfte multipliziert mit dem Abstand vom Hauptdeck bis zum vertikalen Segeldruckpunkt aus Tabelle 4.6 (dort bezogen auf CWL) ergibt die Momente an den Masten. Es wurde nicht geprüft, in wie weit das am Fockmast befestigte Vorsegel einen Beitrag dazu leistet. Die Momente durch stehendes und laufendes Gut wurden nicht berücksichtigt. In der Stabilitätsberechnung wurde das IMO-Windkriterium bei 7 Bft nicht mehr erfüllt, sodass die Segel vorher gerefft werden müssten. Für den Fall, dass die Crew weiterhin mit voller Besegelung fährt, soll das Schiff dennoch den Belastungen standhalten und auch ein Mastbruch ausgeschlossen werden. Die Momente des vorderen Flettner-Rotors sind durch die um einen Meter niedrigere Anordnung und dem Stand auf dem Vordeck etwas geringer als die des hinteren Rotors. Sollten die Flettner-Rotoren nicht auf dem Deck stehen, sondern ähnlich wie durchgesteckte Masten tiefer im Schiff gelagert werden, so müssten die Momente auf diesen Punkt bezogen werden.

4.4. Flettner-Auslegung

Die SOLAS (2002)-Regulierung 22 in Kapitel V zur freien Sicht von der Brücke für die Navigation beschreibt, dass der Schiffsführer mindestens zwei Schiffslängen vor dem Bug freie Sicht auf die Wasseroberfläche haben muss. Des Weiteren darf die Sichtbeeinträchtigung durch Ladung, Aufbauten oder sonstige Objekte jeweils maximal fünf Grad betragen.

Der hintere Rotor sollte bei 31,80 m stehen, was 21,00 m vor der Brücke ist. Der maximale Durchmesser d_1 darf an dieser Position 1,82 m betragen, um innerhalb der fünf Grad Sichtabdeckung zu bleiben. Die grafische Grundlage für Formel 4.36

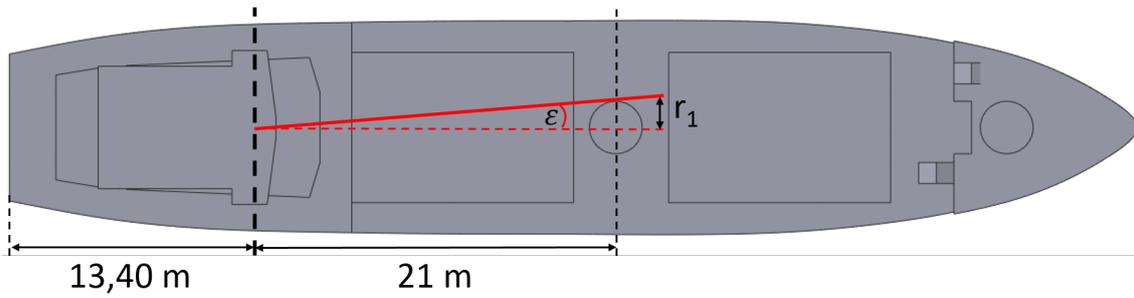
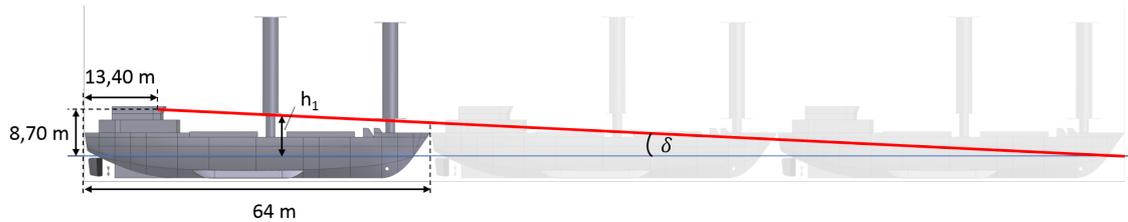
Abbildung 4.50.: Die Sichtstrahlabdeckung darf maximal 5° betragen.

Abbildung 4.51.: Der Sichtstrahl in der Seitenansicht

ist in Abbildung 4.50 zu sehen.

$$d_1 = \tan(\varepsilon) \cdot 21m \cdot 2 = \tan(2,5^\circ) \cdot 21m \cdot 2 = 1,83m \quad (4.36)$$

Für den vorderen Rotor bei 54 m und einem Abstand von 43,80 m von der Brücke beträgt der maximale Durchmesser 3,78 m. Da die Rotoren einen Durchmesser von 3 m haben, muss der hintere auf einem säulenartigen Podest mit einem maximalen Durchmesser d_1 über den Sichtstrahl gehoben werden, welcher wie in Abbildung 4.51 zwei Schiffslängen vor dem Schiff auf die Wasserfläche zeigt. Um einen Übergang von der schmalen Stützsäule zum breiteren Rotor zu schaffen, wird ein Konus mit einem 45° -Winkel dazwischen gesetzt. Um von 1,80 m auf 3 m Durchmesser zu kommen, muss er eine Höhe von 0,60 m haben.

Die selbe SOLAS-Verordnung legt die Bezugshöhe des Sichtstrahls des Schiffsführers mit 1,80 m Höhe über Brückendeck fest. Das Brückendeck liegt in 10,80 m Höhe vom Kiel aus, sodass sich die Augen des Schiffsführers 8,70 m über der Wasserlinie befinden, sofern das Schiff bei einem Tiefgang von 3,90 m voll abgeladenen ist. Wenn der Schiffsführer horizontal bei 10,80 m vom AP bzw. 13,40 m vom Heck aus steht, beträgt die Ankathete bzw. die horizontale Länge des Sichtstrahls drei Mal die Schiffslänge von 64 m minus 13,40 m, also 178,2 m. Der Winkel δ zur Wasserfläche ist

$$\delta = \arctan\left(\frac{8,70m}{178,20m}\right) = 2,8^\circ \quad (4.37)$$

Tabelle 4.9.: Positionen der kleinen Flettner-Rotoren im Schiffskoordinatensystem

Rotor	x [m]	z - Beginn [m]	z - Ende [m]
hinten	31,80	12,20	30,20
vorne	54,00	11,00	29,00

Die Ankathete bis zum hinteren Rotor beträgt 157,60 m. Mit dieser Vorgabe wurde die Mindesthöhe des Rotors berechnet, ab der er sich oberhalb des Sichtstrahls befindet. Hinzu kommen der Konus sowie der Tiefgang, sodass die Unterkante des hinteren Rotors in einer Höhe von 12,20 m angesetzt werden konnte.

$$h_1 = \tan(\delta) \cdot 157,60m + 0,60m + 3,90m = 12,21m \quad (4.38)$$

Der vordere Rotor liegt innerhalb der fünf Grad Abdeckung und müsste daher nicht höher angebracht werden. Durch den Endscheibendurchmesser von 6 m musste der vordere Rotor dennoch in einer Höhe von 11 m angebracht werden, damit die Besatzung unter der rotierenden Endscheibe entlang gehen kann. Daraus ergeben sich die Positionen der Rotoren wie in Tabelle 4.9 angegeben.

4.5. Hochsegelrigg-Auslegung

Das Rigg wurde mit Computational Fluid Dynamics (CFD) auf seine Umströmung und mit Finite Element Analysis (FEA) auf seine Festigkeit untersucht. Des Weiteren konnte die Festigkeit auch ansatzweise über die Balkentheorie aus der Mechanik ermittelt werden.

4.5.1. Mastberechnung

Der Mast kann wie in Abbildung 4.52 als Balkensystem mit Lagern dargestellt werden. Der Mast wird auf eine passende Hülse im Rumpf aufgesteckt und fixiert sich durch sein Eigengewicht selbst. Daher kann er als fest eingespannt betrachtet werden. Wären diese Größen bekannt, so wäre die vertikale Lagerreaktionskraft gleich der Gewichtskraft und der senkrechten Komponente der Vorspannungskraft. Es wird angenommen, dass sich der Mast in der Schiebehülse nicht drehen kann, sodass er ein Moment in die Einspannung übertragen kann. Am oberen Mastende befindet sich ein Loslager. Da die Vorspannkkräfte der Stagen nicht bekannt sind, wird angenommen, dass sie den Mast lediglich in Position halten. Ist der Mast durchgesteckt und reicht bis zum Kiel, müsste sich auf der Höhe des Hauptdecks (und eventuell auch bei den Zwischendecks) noch ein Loslager befinden. Diese wurden zur Vereinfachten BBestimmung des Systems in der Untersuchung nicht berücksichtigt. Auf den Mast

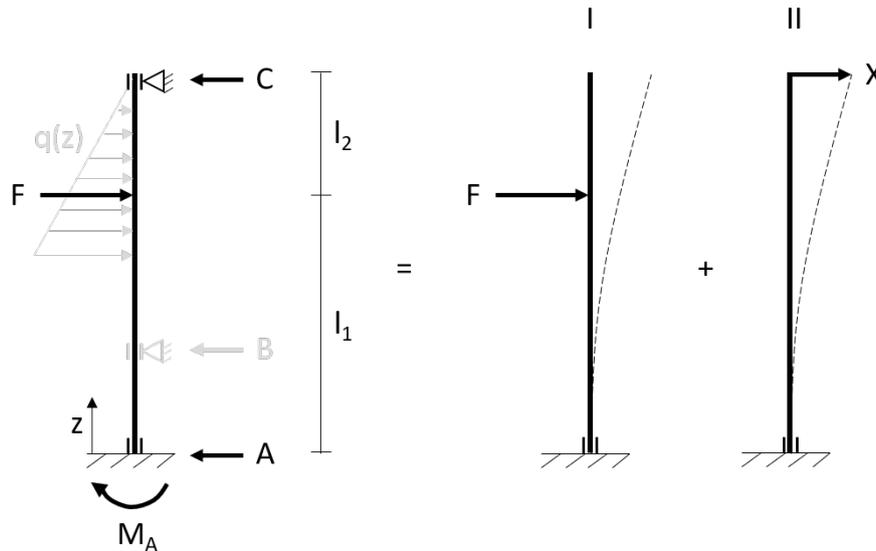


Abbildung 4.52.: Zerlegung des Balkenmodells in zwei Teilsysteme

wirkt die Kraft des Segels. Im Fall eines Hochsegels wäre es eine Flächenlast $q(z)$ in Form eines Dreiecks. Da über die Segelkoeffizienten und die Gesamtfläche des Segels nur die Gesamtkräfte berechnet wurde, wurde auch nur mit der resultierenden Kraft F gerechnet. Sie wurde auf Höhe des Flächenschwerpunktes, also etwa ein Drittel des Vorlieks über dem Baum, angesetzt. Ein Ansatz für einen genaueren Kraft- und Momentenverlauf wäre die Darstellung der Gesamtkraft als Geradenfunktion und die daraus resultierende Betrachtung einer Flächenlast gewesen.

Das System in Abbildung 4.52 ist unbestimmt, da es drei bis vier unbekannte Lagerkräfte (A , B , C , M_A), aber nur zwei Gleichungen gibt: Die Summe aller horizontalen Kräfte und die Summe aller Momente muss Null sein. In diesem Fall wurde das System in zwei Teilsysteme zerlegen und die gesamte Biegelinie am Ende durch Superposition ermittelt. Das obere Lager wurde also im ersten Teilsystem weggelassen. Dessen Einzelkraft wurde dann im zweiten Teilsystem berechnet.

Um die Biegelinie zu bekommen, wurde an den Systemen die Schnittlasten wie in Abbildung 4.53 gebildet. Für das erste System gilt für die Summe der Momente:

$$\begin{aligned} \sum M = 0 &= M_I(z) + F(l_1 - z) \\ M_I(z) &= -F(l_1 - z) \end{aligned} \quad (4.39)$$

Die Durchbiegung des Balkens $w(z)$ berechnete sich aus der Differentialgleichung:

$$EIw_I''(z) = -M_I(z) = F(l_1 - z) = Fl_1 - Fz \quad (4.40)$$

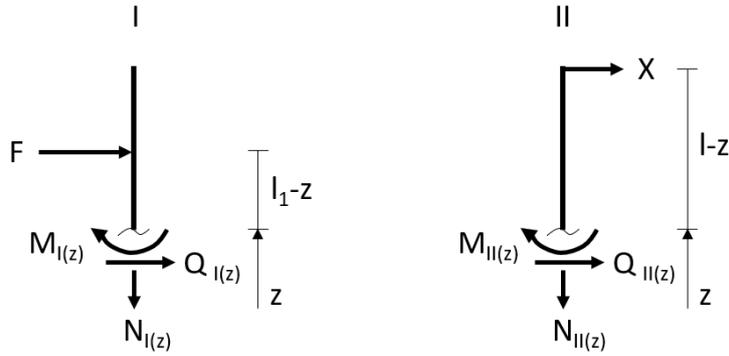


Abbildung 4.53.: Schnittlasten an den beiden Teilsystemen

Hierin befanden sich der Elastizitätsmodul E des Werkstoffs und das Flächenträgheitsmoment $I_{yy}(z)$ bezüglich der z -Achse. Integriert ergab sich mit den Integrationskonstanten:

$$EIw'_I(z) = Fl_1z - \frac{1}{2}Fz^2 + C_1 \quad (4.41)$$

$$EIw_I(z) = \frac{1}{2}Fl_1z^2 - \frac{1}{6}Fz^3 + C_1z + C_2 \quad (4.42)$$

Die Integrationskonstanten konnten mit den beiden Randbedingungen gelöst werden. Die erste Annahme besagte, dass die Durchbiegung $w(z)$ bei der Einspannung Null ist. Zusätzlich wurde angenommen, dass der Neigungswinkel und somit die Steigung $w'(z)$ bei der Schiebehülse ebenso Null sind:

$$w_I(z = 0) = 0 = C_2 \quad (4.43)$$

$$w'_I(z = 0) = 0 = C_1 \quad (4.44)$$

Somit ergab sich für die Biegelinie des ersten Systems am Ende des Mastes mit $l = l_1 + l_2$:

$$w_I(l) = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2}Fl_1l^2 - \frac{1}{6}Fl^3 \right) \quad (4.45)$$

Das zweite System wurde in gleicher Weise berechnet:

$$\begin{aligned} \sum M = 0 &= M_{II}(z) + X(l - z) \\ M_{II}(z) &= -X(l - z) \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$EIw''_{II}(z) = -M_{II}(z) = X(l - z) = Xl - Xz \quad (4.47)$$

$$EIw'_{II}(z) = Xlz - \frac{1}{2}Xz^2 + C_1 \quad (4.48)$$

$$EIw_{II}(z) = \frac{1}{2}Xlz^2 - \frac{1}{6}Xz^3 + C_1z + C_2 \quad (4.49)$$

Dabei wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

$$w_{II}(z = 0) = 0 = C_2 \quad (4.50)$$

$$w'_{II}(z = 0) = 0 = C_1 \quad (4.51)$$

Somit ergab sich für die Biegelinie des zweiten Systems am Ende des Mastes:

$$w_{II}(l) = \frac{1}{EI} \frac{1}{3} X l^3 \quad (4.52)$$

Durch Superposition ließ sich die Auflagerkraft X am Mastende bestimmen:

$$\begin{aligned} w_I(l) + w_{II}(l) = 0 &= \frac{1}{2} F l_1 l^2 - \frac{1}{6} F l^3 + \frac{1}{3} X l^3 \\ X &= \frac{1}{2} F \left(1 - 3 \frac{l_1}{l} \right) \end{aligned} \quad (4.53)$$

Die Biegelinie am Gesamtsystem wurde durch die Gleichungen (4.42) und (4.49) beschrieben:

$$\begin{aligned} w(z) &= w_I(z) + w_{II}(z) \\ w(z) &= \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} F l_1 z^2 - \frac{1}{6} F z^3 + \frac{1}{4} F \left(1 - 3 \frac{l_1}{l} \right) l z^2 - \frac{1}{12} F \left(1 - 3 \frac{l_1}{l} \right) z^3 \right) \\ w(z) &= \frac{F z^2}{4EI} \left(l - l_1 - z \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.54)$$

Anschließend wurden die übrigen Lagerreaktionen aus Abbildung 4.52 bestimmt:

$$\begin{aligned} \sum F = 0 &= A - F - X \\ A &= \frac{3}{2} F \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} \sum M^A = 0 &= M_A + F l_1 + X l \\ M_A &= \frac{1}{2} F (l_1 - l) \end{aligned} \quad (4.56)$$

Somit waren die Querkraft und das Moment bekannt, die in Abhängigkeit der Segelkraft und der Mastlänge auf die Einspannung des Mastes wirkten. Diese Werte wurden für die Auslegung der Stahlstruktur um die Masten genutzt. Für den Großmast betragen $l_1 = 11m$ und $l_2 = 32m$. Für die Querkraft im Deck beim Lager B wurde $l_1 = 4m$ gewählt. Die Berechnung von X über das Moment ist in diesem Fall allerdings mit Unsicherheiten belegt.

Tabelle 4.10.: Positionen der Hochsegel-Masten im Schiffskoordinatensystem

Hochsegel	x - Beginn [m]	x - Ende [m]	z [m]
Besan-Mast	14,00	-	39,40
Groß-Mast	30,60	-	43,70
Fock-Mast	48,50	-	43,70
Besan-Baum	3,20	14,00	14,50
Groß-Baum	16,00	30,50	11,30
Fock-Baum	32,50	48,50	10,80
Vor-Baum	49,50	60,20	10,00

4.5.2. CFD-Untersuchung

Die Positionen der Masten und Bäume sind in Tabelle 4.10 aufgeführt, wobei die Endpositionen der Bäume noch den Mastenmittelpunkten entsprechen, weil der notwendige Mastdurchmesser nicht festgelegt wurden.

Für die Auslegung mit Hochsegeln sind an der Hochschule im Rahmen des Fachs „Simulation and Modeling“ CFD-Untersuchungen von Heldens u. a. (2018) vorgenommen worden. Der Schiffsrumpf wurde als Volumenmodell aus Siemens NX importiert, die Decksaufbauten und Masten sind in Free CAD entworfen worden. Die Segelprofile wurden in der CAD-Anwendung Sailcut erstellt. Die CFD-Simulation wurde mit OpenFOAM durchgeführt und in Paraview visualisiert.

Das Berechnungsgitter für die Simulation bestand aus einem Cylinder von 100 m Radius, in welchem sich das Schiff, wie in Abbildung 4.54 zu sehen, befand. Zum Körper hin wurde das Netz immer feiner wie Abbildung 4.55 zeigt. Nähere Angaben zu den Eigenschaften des Gitters sind im Anhang A.4.3 aufgelistet.

Das Ergebnis ist in den Abbildungen 4.56 und 4.57 dargestellt. Die roten Stromlinien zeigen eine Beschleunigung bei der Umströmung der Segel und des Schiffsrumpfs, wohingegen die blauen eine Verlangsamung bedeuten. Durch die Umströmung des Objekts entstand eine unstetige turbulente Strömung.

Des Weiteren konnte das zugehörige Geschwindigkeitsfeld in Abbildung 4.58 und das Druckfeld in Abbildung 4.59 angezeigt werden. Die Umströmung erfolgte aus 45° von rechts unten nach links oben mit einer nominellen Geschwindigkeit von 4 m/s. Die Segel waren leicht angestellt. Die weißen Kreise sind die Masten, dahinter war die Geschwindigkeit (in Blau dargestellt) null. Besonders das Vorsegel zeigt in Abbildung 4.58 ein großes Ablösegebiet. Dies geht einher mit einem Unterdruckgebiet in Abbildung 4.59, dargestellt in Grün. Es ist gut ersichtlich, wie das Vorsegel

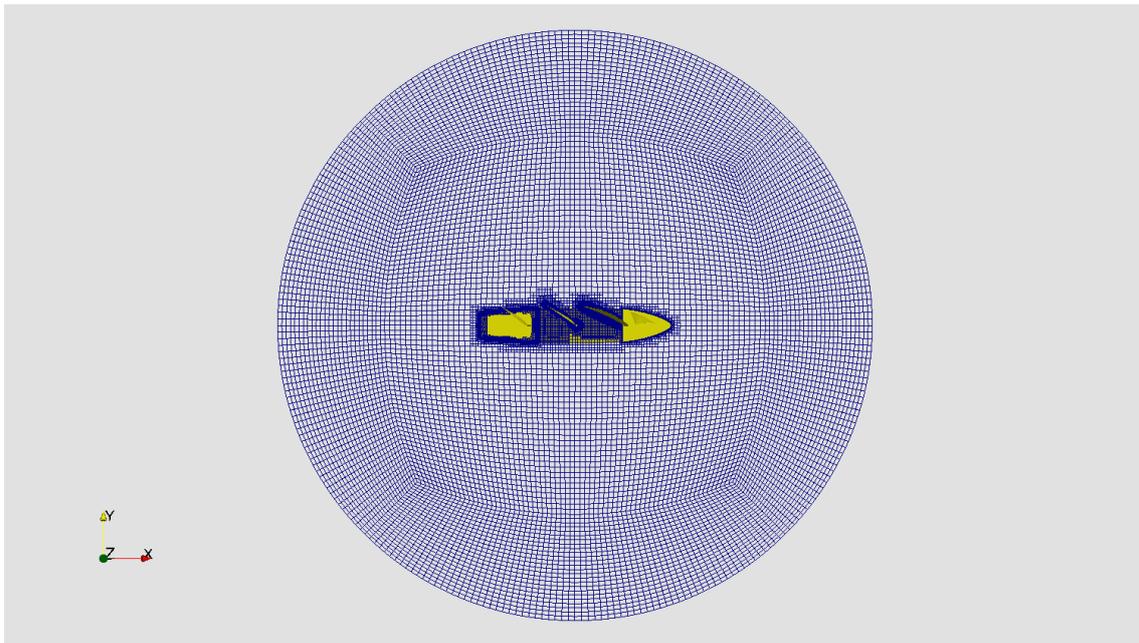


Abbildung 4.54.: Gitter für CFD-Untersuchungen (Heldens u. a., 2018)

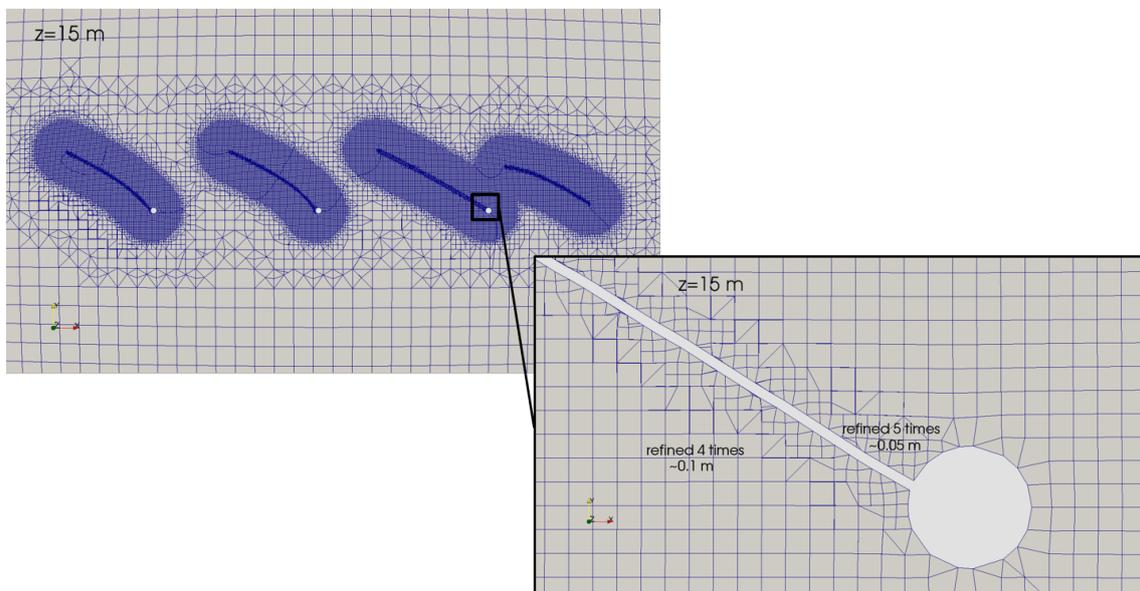


Abbildung 4.55.: Um die Körper wird das Gitter immer feiner (Heldens u. a., 2018).

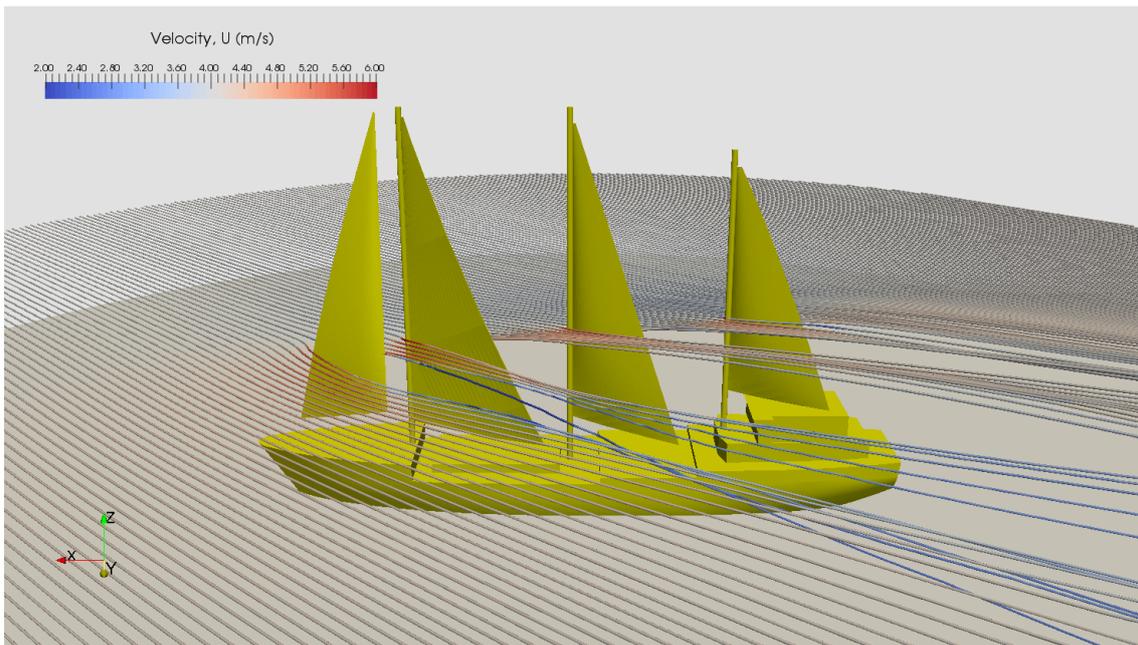


Abbildung 4.56.: Stromlinien um die Segel (Heldens u. a., 2018)

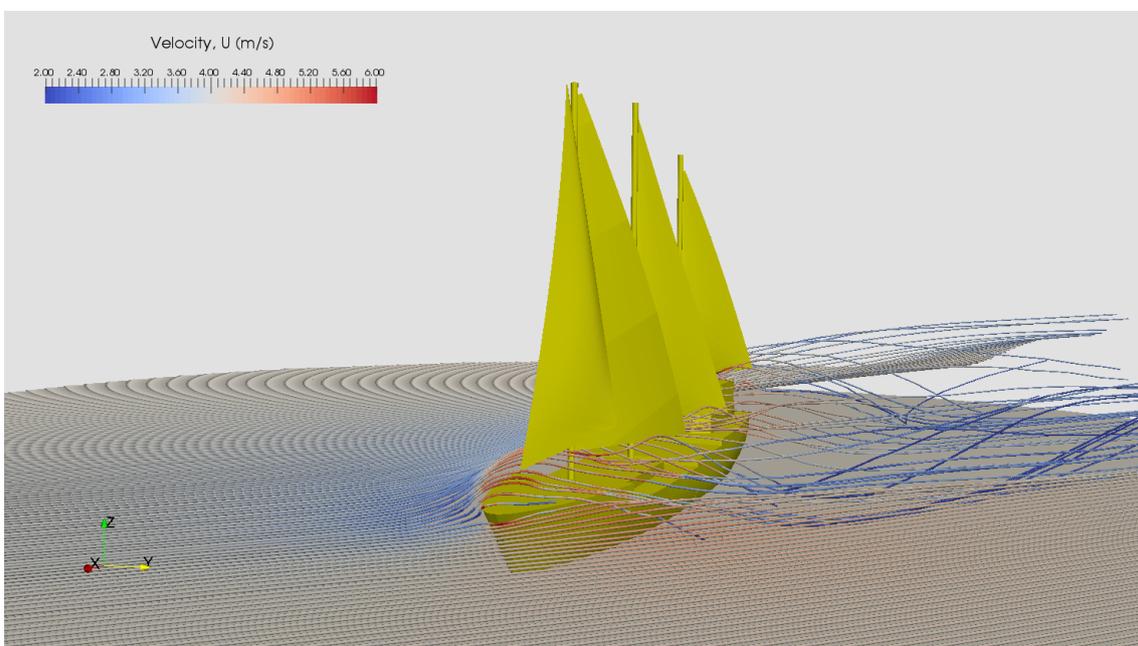


Abbildung 4.57.: Stromlinien um das Schiff (Heldens u. a., 2018)

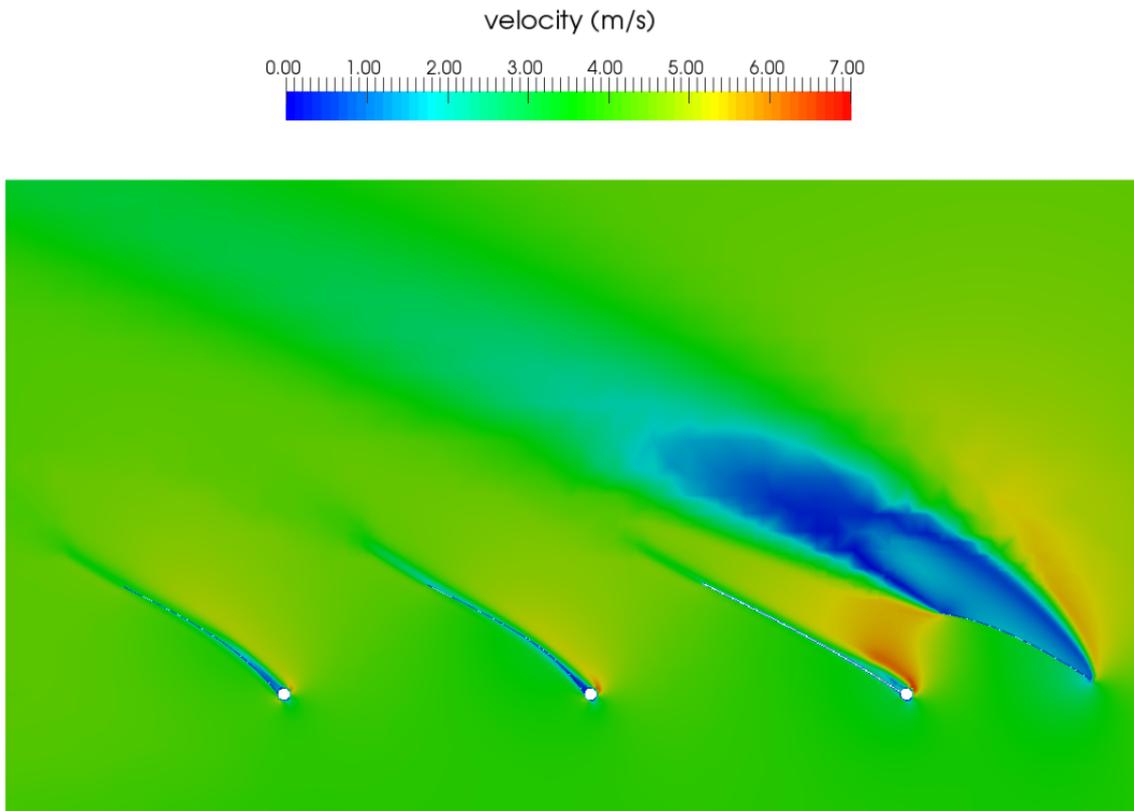


Abbildung 4.58.: Geschwindigkeitsfeld um die Segel (Heldens u. a., 2018)

und die Fock zusammen einen großen Unterdruck erzeugten, welcher das Schiff vorwärts zog. Rot sind Gebiete mit Überdruck.

4.5.3. FEA-Untersuchung

In der Vergangenheit wurden Masten häufig beruhend auf Erfahrungswerten beruhend ausgelegt und dimensioniert. Es wurde nicht abschließend geklärt, wie die Mastauslegung genau zu erfolgen hat, z.B. welche Lasten unter welchen Bedingungen angenommen werden müssen. Die meisten Methoden wie z.B. die nach Larsson u. a. (2016), Sheahan (1992) und Scharping (1994) verwenden das stabilisierende Moment bei 30° Krängung. Jedoch liegen diesen Annahmen Faktoren zur Mastlagerung und für Abstände zu Grunde, die im Jachtbau entwickelt wurden und dort auf Erfahrungswerten beruhen. Ihre Vorgehensweisen zur Berechnung des Flächenträgheitsmoments sind sehr unterschiedlich und führten für den GreenSailer zu stark voneinander abweichenden Ergebnissen.

Der DNV GL (2016) stützt sich auf empirische Formeln, die nur Wind von der Seite bei 25° Krängung betrachten. Der Wind von hinten wird nicht betrachtet, sodass

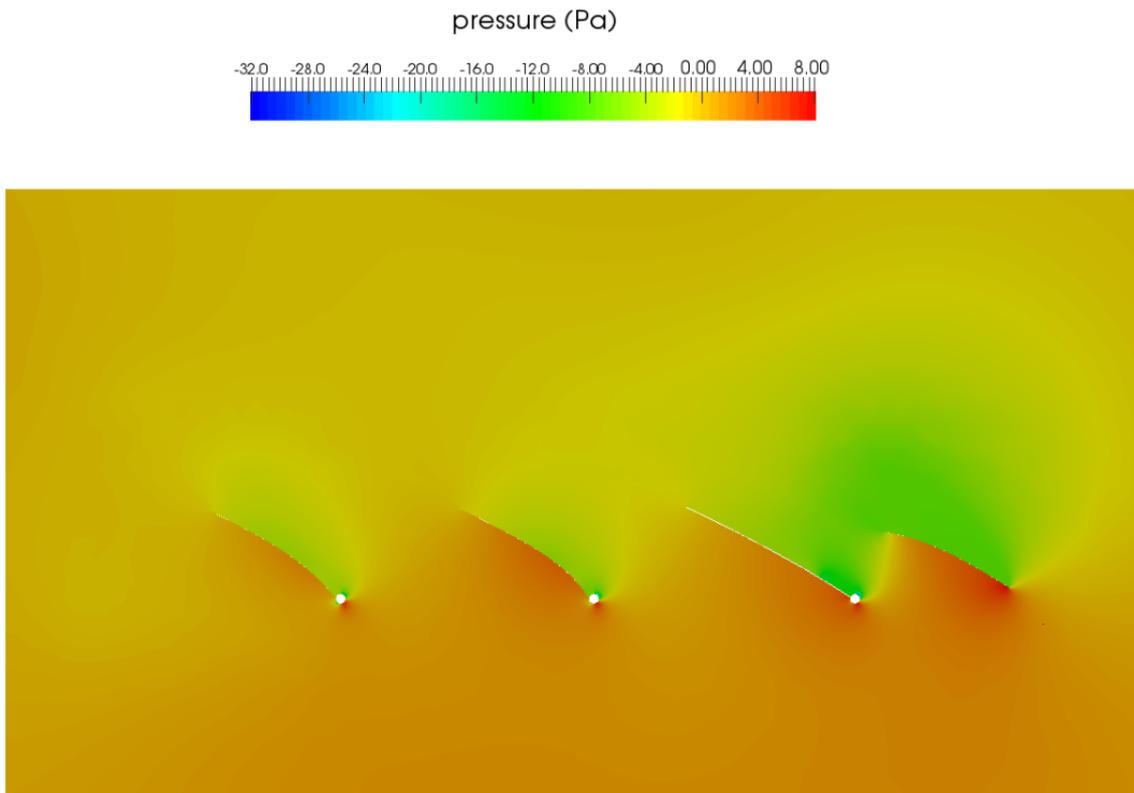


Abbildung 4.59.: Druckfeld um die Segel (Heldens u. a., 2018)

die Stagen hiernach nicht ausgelegt werden können. Es wird auch nur eine klassische Anordnung von Großsegel und Vorsegel betrachtet, bei der die Fläche des Vorsegels in die Querkraft des Großsegels mit einght. Eine Aussage über die Auslegung weiterer Masten fehlt.

Die Gesamtquerkraft des Großsegels wird beim DNV GL dann auf die Angriffspunkte der Salinge entlang des Mastes aufgeteilt. Eine andere Herangehensweise wäre die Simulation des Winddrucks auf ein Segel. Dieses müsste dann jedoch mit einem Material in der FEA-Software angenommen werden, was wiederum eine gewisse Steifigkeit bedingt. Ein Vergleich der beiden Modelle wurde nicht vorgenommen.

Für die FE-Analyse in ANSYS wurden die Querkräfte an den Schnittpunkten der Salinge mit dem Mast wie in Abbildung 4.60 angesetzt. Die Durchmesser der Salinge und Wanten wurden wie in Abbildung 4.61 gewählt. Für die Masten und Salinge wurde die Aluminiumlegierung 6061 gewählt. Die beiden vorderen Masten wurden mit einem Außendurchmesser von 840 mm und einer Wandstärke von 30 mm gerechnet, der Besanmast mit einem Außendurchmesser von 700 mm und einer Wandstärke von 15 mm.

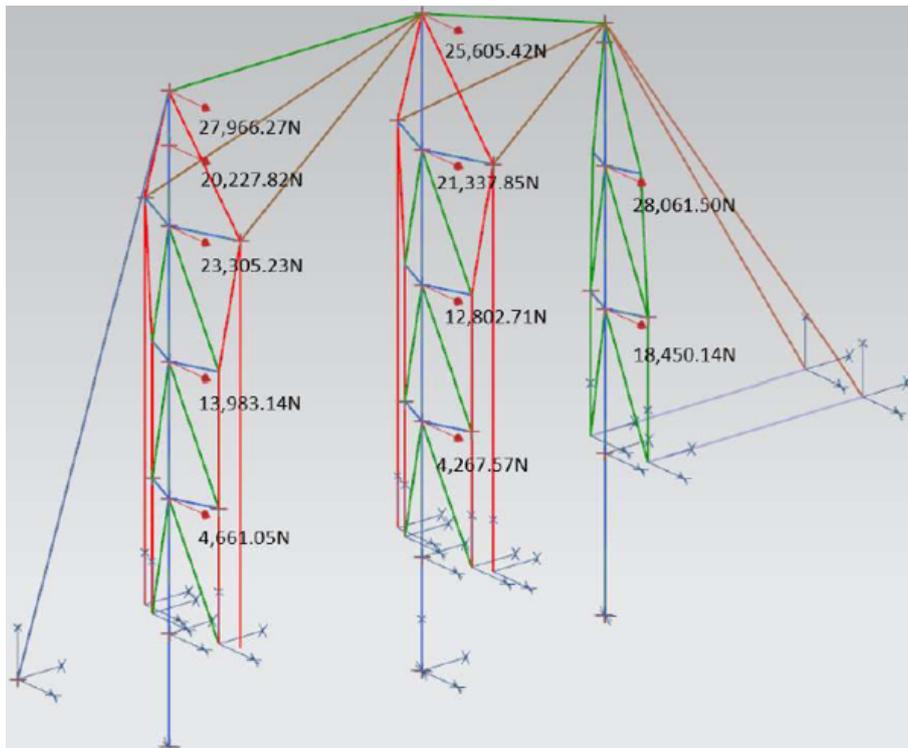


Abbildung 4.60.: Auf die Masten wirkenden Kräfte im FE-Modell (Thaotaku, 2020)

Das Ergebnis der FE-Analyse zeigt in Abbildung 4.62, dass sich der Fockmast an der Spitze um 1,70 m nach hinten biegt. Der Großmast biegt sich 1,30 m und der Besanmast 1 m. Es werden alle Mindestanforderungen von DNV GL eingehalten. Das gilt auch für das Buckling in Abbildung 4.63. Weitere Ergebnisse und Details der Berechnungen können der Arbeit von Thaotaku (2020) entnommen werden.

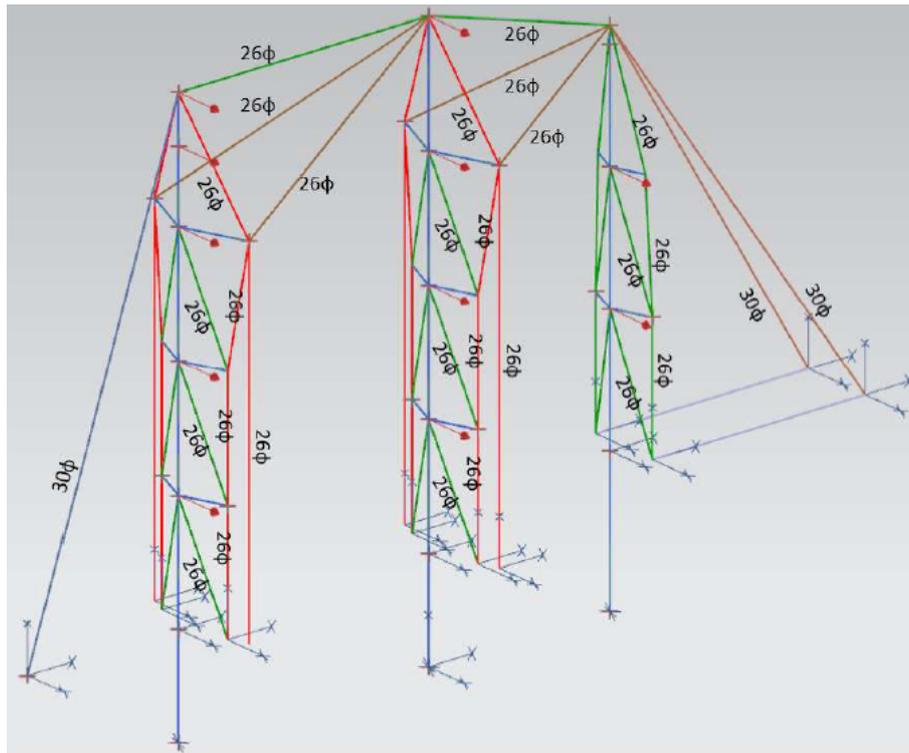


Abbildung 4.61.: Gewählte Durchmesser der Salinge und Wanten im FE-Modell (Thaotaku, 2020)

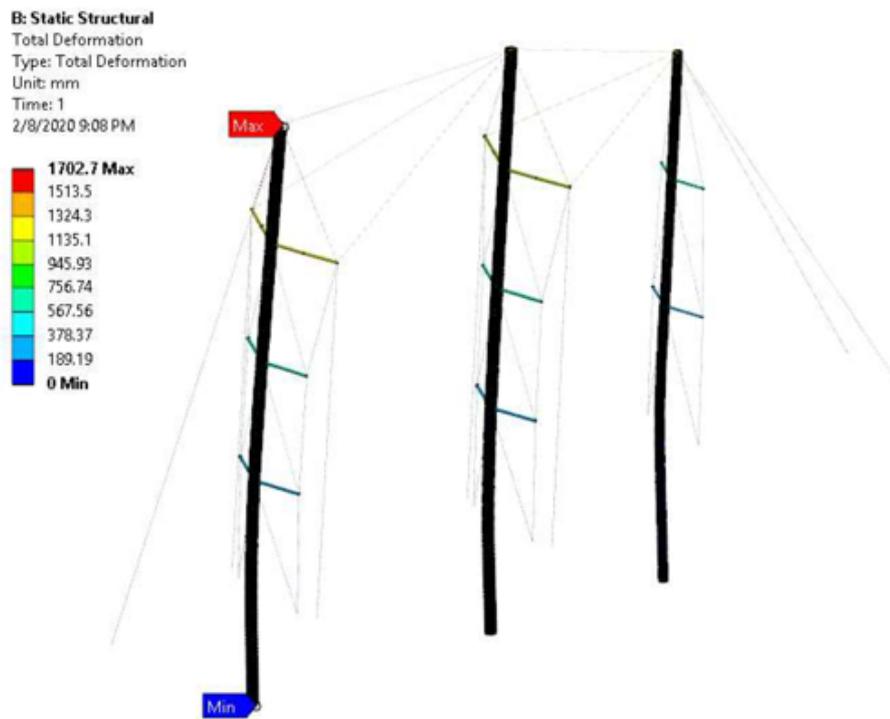


Abbildung 4.62.: Deformation der Masten im FE-Modell (Thaotaku, 2020)

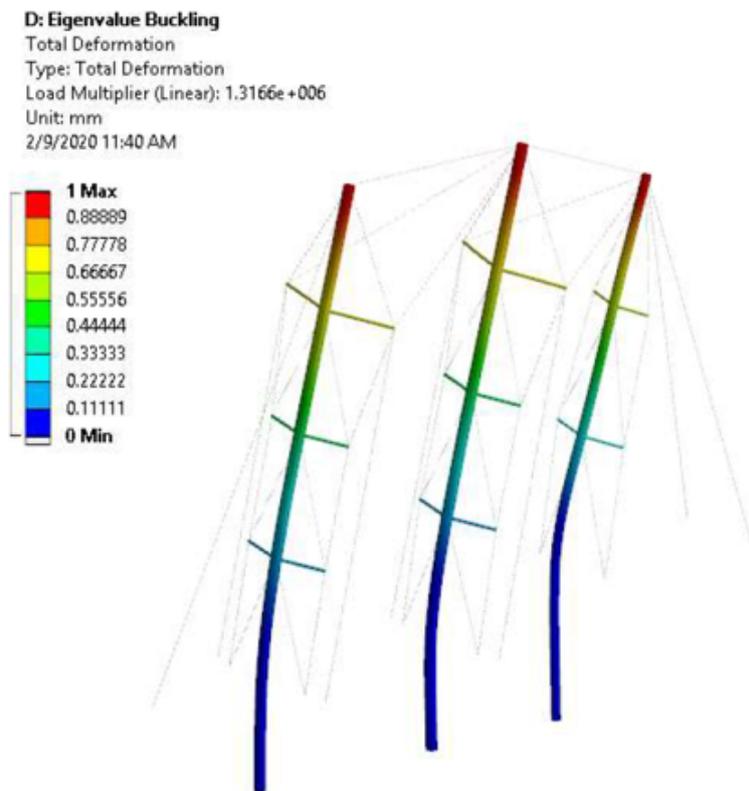


Abbildung 4.63.: Buckling der Masten im FE-Modell (Thaotaku, 2020)

AP 5: Schiffstechnik

Zunächst wird der Energiebedarf ermittelt, um die notwendigen Komponenten für eine ausreichende Energieerzeugung bestimmen zu können. Für eine zusätzliche Energiespeicherung erfolgt eine Batterieauslegung. Anschließend wird eine Übersicht des Hauptmaschinenraums mit den erforderlichen Komponenten gezeigt. Die erforderliche Größe von Tanks und Leistung von Pumpen wird berechnet. Abschließend wird auf die Forschungseinrichtungen eingegangen.

5.1. Bordnetz

Unter dem Begriff Bordnetz zusammengefasst sind der Energiebedarf, die Energieerzeugung und -speicherung.

5.1.1. Energiebedarf

Um den Energiebedarf des Schiffes decken zu können, musste dieser durch eine Auflistung aller elektrischen Verbraucher ermittelt werden. Lücken (2019) hat in seiner Bachelorarbeit die sich an Bord befindenden Geräte mit ihrem Verbrauch ermittelt und den Energiebedarf von großen Verbrauchern wie der Lüftungsanlage und Klimaanlage abhängig von der Raumgröße und Temperatur sowie den Leistungsbedarf der Ankerwinde, Rudermaschine, Heckklappenwinde und Lukendeckelöffnung berechnet. Zur Ermittlung des worst case wurden verschiedene Wetterszenarien, Antriebskonfigurationen und Betriebsarten (E-Motor, Flettner, Segel, Hafenbetrieb) simuliert. Der höchste Energiebedarf bzw. Verbrauch mit ca. 475 kW ergab sich bei Schlechtwetter unter Verwendung des E-Motors bei Maximallast und laufender Klimaanlage. Das Szenario mit den einzelnen Verbrauchern ist in Tabelle 5.11 dargestellt, wobei davon ausgegangen wurde, dass nicht alle Geräte permanent, sondern nur die halbe Zeit laufen.

Die Manövriersysteme sind in Kapitel 2.4 ausgelegt worden. Mit dem erforderlichen Schub für den Propeller wurden die notwendigen Leistungen für die Hauptmaschine (E-Motor) und den Querstrahler bestimmt.

Tabelle 5.11.: Energiebedarf des GreenSailers bei Schlechtwetter im Sommer

*1 Prozentsatzanteil des Energieverbrauchs (3600 kWh) eines fünf Personen Haushalts in einem Mehrfamilienhaus pro Jahr

*2 Umrechnung des Prozentsatzanteils auf den Energiebedarf von 20 Personen pro Stunde

*3 Die Angaben wurden aus den Anbieterseiten entnommen, siehe Anlagen von Lücken (2019)

*4 Für 1000 m³ Aufenthaltsräume (TROTEC, 2020)

Verbraucher	An/ aus	#	Leistungsbedarf/ Verbraucher [W]	Leistungs- Bedarf [W]	*
Be- und Entlüftung					
Hauptbelüftungsanlage	1	1	536	536	
Pumpenraum	1	1	12	12	
Kombüse	1	1	472	472	
Laderaum 1, max. 700 m ³	1	1	416	416	
Laderaum 2, max. 500 m ³	1	1	332	332	
Bootsmannlager	1	1	12	12	
ECR	1	1	12	12	
Farbenlager	1	1	12	12	
Maschinenraum	1	1	1500	1500	
				3304	
Verpflegung (35 %)¹					2, 3
Herd	0,5	1	156000	7800	3
Backofen	0,5	1	7000	3500	3
Friteuse	0,5	1	3250	1625	3
Dunstabzug	0,5	1	147	73,5	3
Kühlschrank	0,5	2	200	200	3
Spülmaschine	0,5	1	8890	4445	3
Kühlraum	0,5	1	990	495	3
Tiefkühlschrank	0,5	1	540	270	3
				18408,5	
Unterkünfte					
Beleuchtung (9 %) ¹	1	100	5	500	2, 3
Audio, Video, IT (27 %) ¹	0,5	20	80	800	2, 3
				1300	
Brücke					
Scheibenwischenanlage	1	5	65,9	329,5	3
RADAR FAR-2xx7	1	2	1032,2	2064,4	3
ECDIS Furuno	1	2	33,6	67,2	3

FMD-3200/3300					
GPS Furuno GP-150	1	2	9,6	19,2	3
Dopplerlog	1	1	14,4	14,4	3
Furuno GS-100					
Echolot Furuno FE-800	1	1	132,8	132,8	3
VDR Furuno VR-7000	1	1	177,8	177,8	3
Notsignalempfänger	1	1	10	10	3
Furuno RT-100					
VHF Furuno	1	2	25	50	3
FM-8800S/D					
MF/HF Furuno	1	1	500	500	3
FS-XX70					
Inmarsat Furuno	1	1	60	60	3
FELCOM16					
Inmarsat C Furuno	1	1	120	120	3
RC-1800F2					
Navtex-Wetterfax	1	1	12	12	3
Furuno FAX-30					
AIS Furuno FA-150	1	1	87,6	87,6	3
Kreiselkompass	1	1	269	269	3
Raytheon Standard 22					
Autopilot Raytheon	1	1	25	25	3
PilotStar® NX					
Thypon	0	1	330	0	3
ZETFON 300/310					
Positionslichter	1	8	15	120	3
Computer Lenovo	1	2	65	130	3
ThinkPad E580					
				4188,9	
Wäsche (13 %)¹					2, 3
Waschmaschine	0,5	1	7940	3970	3
Wäschetrockner	0,5	1	7950	3975	3
Bügeleisen	0,5	1	2200	1100	3
				9045	
Ladungsumschlag					
Ladungsrechner	1	1	65	65	3
Hydraulikpumpe	0	1		0	
Ladekran SWL 3,0 t					
Seilwinde Ladekran	0	1		0	

Seilwinde Ladeluken	0	1		0	
Fock- u. Ladebaum SWL 1,5 t	0	1		0	
Ballastwasserpumpe NR4 125 A/A	0	2	4000	0	3
Ballastwasserbehand- lungsanlage HMT-300	0	1	5000	0	3
Bilgenpumpe	0	4	2200	0	3
Heckklappe	0	1		0	
Versorgungsanlagen				65	
Klimaanlage	1	1	55000	55000	4
Zentralheizung	0	1	38968,25	0	
Hauswasserwerk	0	1	1800	0	3
Grauwasser Hebeanlage Aqualift F Duo	0	1	3000	0	3
Schwarzwasser Hebe- anlage Aqualift F Duo	0	1	3000	0	3
Labor				55000	
Computer	0,5	2	130	130	3
andere Verbraucher	0,5	1	200	100	
Kühl-Gefrierkombination	0,5	1	20,6	10,3	3
Arbeitsgeräte				240,3	
Hochdruckreiniger Kärcher HD 5/15 CX	0,5	1	2500	1250	3
Winkelschleifer GWS 17-125 Cl	0	2	1700	0	3
Bohrmaschine Bosch GBM 16-2 RE	0	2	1050	0	3
Schweißgerät Stamos IGBT	0	1	6800	0	3
Freizeiteinrichtungen				1250	
Fitnessgerät	0,5	1	2205,9	1102,95	3
Fernseher (Satellit)	0,5	1	105	52,5	3
				1155,45	

Ankermanöver					
Mooringwinde vorne	0	2	6438,15	0	
Mooringwinde achtern	0	2	6438,15	0	
				0	
Manövrier- Einrichtungen					
Querstrahler SCHOTTEL STT 60	0	1	125000	0	3
Hydraulikanlage Ruder	0,5	1	47204	23602	
				23602	
Haupt- Propulsionsanlagen					
E-Motor	1	1	315000	315000	3
Flettner-Rotor	0	2	70000	0	
Winde Segelsteuerung	0	4	4000	0	
Winde Segel reffen	0	4		0	
				315000	
Maschinenraum/ Sicherheits- Einrichtungen					
Seewasser-, Feuerlösch- Pumpe NR4 100C/B	0	1	1100	0	3
Lenzpumpe	0	2		0	3
				0	
Gesamtverbrauch inkl. 10 % Sicherheit				475,82	

Tabelle 5.11 kann für den Betrieb mit Flettner-Rotoren oder Segeln angepasst werden. Im Szenario mit dem Flettner-Rotor-Betrieb wurden unter voller Rotordrehzahl 283 kW inklusive 10 % Sicherheit benötigt. Im sparsamen Betrieb ohne die Verwendung von Küchengerätschaften, Wäscherei, Fitnessgeräten und zusätzlichen Arbeitsgeräten ergab sich noch ein Bedarf von ca. 227 kW unter voller Rotordrehzahl. Im Betrieb mit Hochsegeln waren es 133 bzw. 91 kW. Im Hafbetrieb konnte es durch den Betrieb von verschiedenen Pumpen und dem Ladekran zu einem Verbrauch von ca. 155 kW kommen. Dieser Bedarf könnte mit Landstrom gedeckt werden. Im Winter werden etwa 16 kW weniger gebraucht, wenn die Zentralheizung statt der Klimaanlage läuft.

5.1.2. Energieerzeugung

Es wird vorgeschlagen, den in Tabelle 5.11 ermittelten Maximalverbrauch von 475 kW mit zwei 200 kW Generatoren und einer 100 kW Mini-Kraft-Wärme-Kopplung abzudecken. Die Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt sowohl Strom als auch die für die Heizung notwendige Wärme und hat somit einen sehr hohen Wirkungsgrad. Sie kann daher immer laufen und bei Bedarf werden die Generatoren hinzugeschaltet. Daher ist es sinnvoll, die Kraft-Wärme-Kopplung in der Mittschiffssektion unterzubringen, um die Belastung der Crew und Passagiere mit Lärm und Vibrationen gering zu halten. Herr Heimhold (2020) schlägt vor, stattdessen einen Abgaswärmetauscher zu nutzen und im Hafen Wasser mit einem Tauchsieder oder oil fired boiler zu erhitzen. Die Heizkörper könnten auch mit Strom betrieben werden.

5.1.3. Energiespeicherung und Batterieauslegung

Die Erzeugung von überschüssiger Energie sollte möglichst vermieden werden. Unter Verwendung von Generatoren kann es jedoch vom Verbrauch und Wirkungsgrad her sinnvoll sein, sie bei einer höheren Leistung zu betreiben. Die Überschüssige Energie kann in Batterien zwischengespeichert werden. Bei einem geringeren Energiebedarf können die Generatoren abgeschaltet und der Bordstrom durch Batterien bereitgestellt werden. Ebenso kann die zusätzliche Energie aus den Batterien im peak shaving zur Abdeckung von Spitzenlasten verwendet werden. Die Batterien könnten im Hafen darüber hinaus mit Landstrom aufgeladen werden.

Der GreenSailer soll nicht nur im Hafen unter Batterie manövrieren, sondern auch darüber hinaus nur unter Verwendung der Batterie fahren können. Dann sollte er mit mindestens 6 kn fahren können; besser noch mit 10 kn zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit. Mit der Widerstandskurve aus dem Modellversuch und einem Fouling-Zuschlag von 10 % betrug entsprechend der Formeln in Kapitel 2.4.1 die notwendige effektive Leistung $P_E = 42,5$ kW. Nach Gleichung (2.9) ergab sich die erforderliche Schubkraft T_{Prop} zu 18,24 kN. Mit dem festgelegten Steigungsverhältnis von $P/D = 0,945$ musste der Propeller und somit der E-Motor 99 rpm haben, um den erforderlichen Schubbeiwert K_T zu erzielen. Über das Freifahrtendiagramm ergaben sich K_Q und somit das Moment, P_D und $P_B = 80$ kW. Nach Tabelle 5.11 benötigte der GreenSailer ohne Motor und zehnerprozentiger Sicherheit 115 kW Bordstrom. Insgesamt müssen die Batterien also 195 kW/h leisten. Gegebenenfalls kann die Wäscherei nicht betrieben werden, wenn das Ruder im Hafen verstärkt gebraucht wird.

Batterien unterscheiden sich in den verwendeten Materialien und ihrem Aufbau, so-

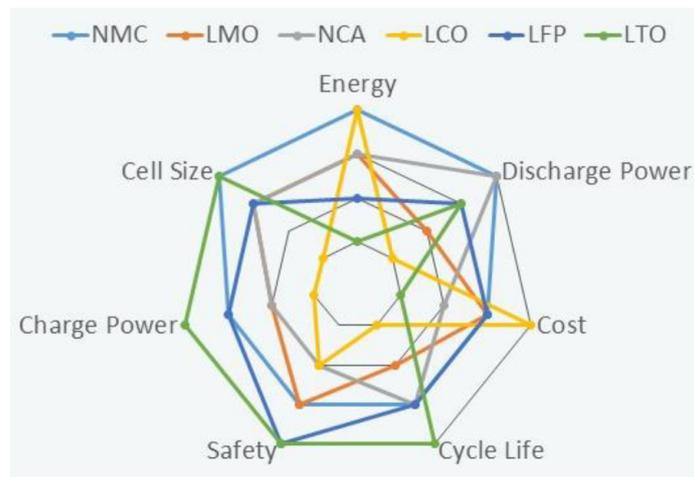


Abbildung 5.64.: Einfluss der chemischen Zusammensetzung einer Batterie (Wuersig, 2019)

NMC - Lithium Nickel Mangan Cobalt Oxid

LMO - Lithium Mangan Oxid

NCA - Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxid

LCO - Lithium Cobalt Oxid

LFP - Lithium Iron Phosphat

LTO - Lithium Titanium Oxid

dass sie unterschiedliche Leistungs- und Energiedichten aufweisen. In letzter Zeit ist die Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie vorangeschritten. Abbildung 5.64 zeigt den Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Energie, Leistung, Kosten, Lebensdauer, Sicherheit, Ladestrom und Zellgröße. NMC-Batterien werden derzeit am häufigsten auf Schiffen verwendet (Wuersig, 2019). Der schweizerisch-deutsche Batteriehersteller Leclanché hat spezielle G/NMC-Zellen mit einer Anode aus Graphit entwickelt, die auf der Fähre *Ellen*, die zwischen den dänischen Häfen Sødby und Aerø verkehrt, zum Einsatz kommen. Das Unternehmen hat zudem spezielle Keramik-Separatoren patentiert, die ein thermisches Versagen verhindern. Somit sind sie sicherer als die von anderen Herstellern (Amanieu, 2020).

Die erforderliche Anzahl an Zellen konnte über die notwendige Energie berechnet werden. Die Berechnung der Spannung und Kapazität ergab, wie viele Zellen entsprechend in Reihe und parallel geschaltet werden mussten. Da Leclanché schon verschiedene Modultypen anbot, konnte auch eine Auslegung nach Modulen erfolgen. Je nachdem, wie die Zellen eines Moduls in Reihe oder parallel geschaltet wurden, ergaben sich andere Spannungen und Kapazitäten. Am Ende wurde die Konfiguration mit den wenigsten benötigten Modulen gewählt. Genaue Angaben über die Module und Zelleigenschaften sowie die Vorgehensweise zur Berechnung sind in der Masterarbeit von Frau Beermann (2020) zu finden.

Die nominelle Energie eines Moduls betrug 6,1 kWh. Die nutzbare Energie entsprach 80 % der Entladetiefe. Für eine Fahrtzeit von zwei Stunden werden 390 kW benötigt. Geteilt durch die nutzbare Energie ergab das 80 Module als Minimum.

Der E-Motor TF62.60 von Oswald benötigte 350 V Wechselstrom. Die Batterie musste dazu 572 V Gleichstrom an den Umrichter liefern (Berechnung siehe (Beermann, 2020)). Für die benötigte Anzahl an Modulen in Reihe wurde die Spannung des Gleichstroms durch die minimale Spannung der jeweiligen Modulkonfiguration geteilt. Multipliziert mit der maximalen Spannung der Module ergab sich die maximale Spannung U_{max} . Für die notwendige Kapazität Q wurde die benötigte Leistung P durch die maximale Spannung U_{max} geteilt und mit der Fahrtzeit multipliziert:

$$Q = \frac{P}{U_{max}} \cdot t \quad (5.57)$$

Die so berechnete Kapazität Q in Amperestunden wurde durch die gegebene nominelle Kapazität der jeweiligen Modulkonfiguration geteilt, um die notwendige Anzahl an Modulen in Parallelschaltung zu erhalten. Um dem Alterungsprozess und dem damit verbundenen Kapazitätsverlust entgegenzuwirken, wurde die Anzahl der parallel geschalteten Module verdoppelt. Die Multiplikation der Module in Reihe und parallel ergab die Gesamtanzahl der benötigten Module. Die Modulkonfiguration von 16 Zellen in Reihe und zwei Zellen parallel war die günstigste. Hier wurden zwölf Module in Reihe und zehn parallel benötigt, was insgesamt 120 Module ergab. Mit einem Gewicht von 48,2 kg pro Modul wog die Batterie am Ende 5,78 t. Ohne die Verdopplung der parallel geschalteten Module hätte sich nach zwei Stunden eine Entladung von 80 % eingestellt. Durch die Alterung der Batterie wird dieser Zustand immer früher erreicht. Durch die Verdopplung der parallel geschalteten Module ergab sich anfangs nach zwei Stunden nur eine Entladung von 53 %, sodass das Schiff anfangs auch noch länger leise und ohne Emissionen hätte fahren können. Des Weiteren sollte die Batterie zum peak shaving verwendet werden, um Spitzenlasten abzufangen. Im Segelbetrieb sollten die Batterien die Energiedifferenz zwischen benötigter Energie und durch die Kraft-Wärme-Kopplung gelieferte Energie ausgleichen, sodass kein weiterer Generator betrieben werden muss.

Das Gewicht der Batterie und des E-Motors sind in der Stabilitätsrechnung als zu gering angenommen worden, sodass diese erneut durchgeführt werden muss.

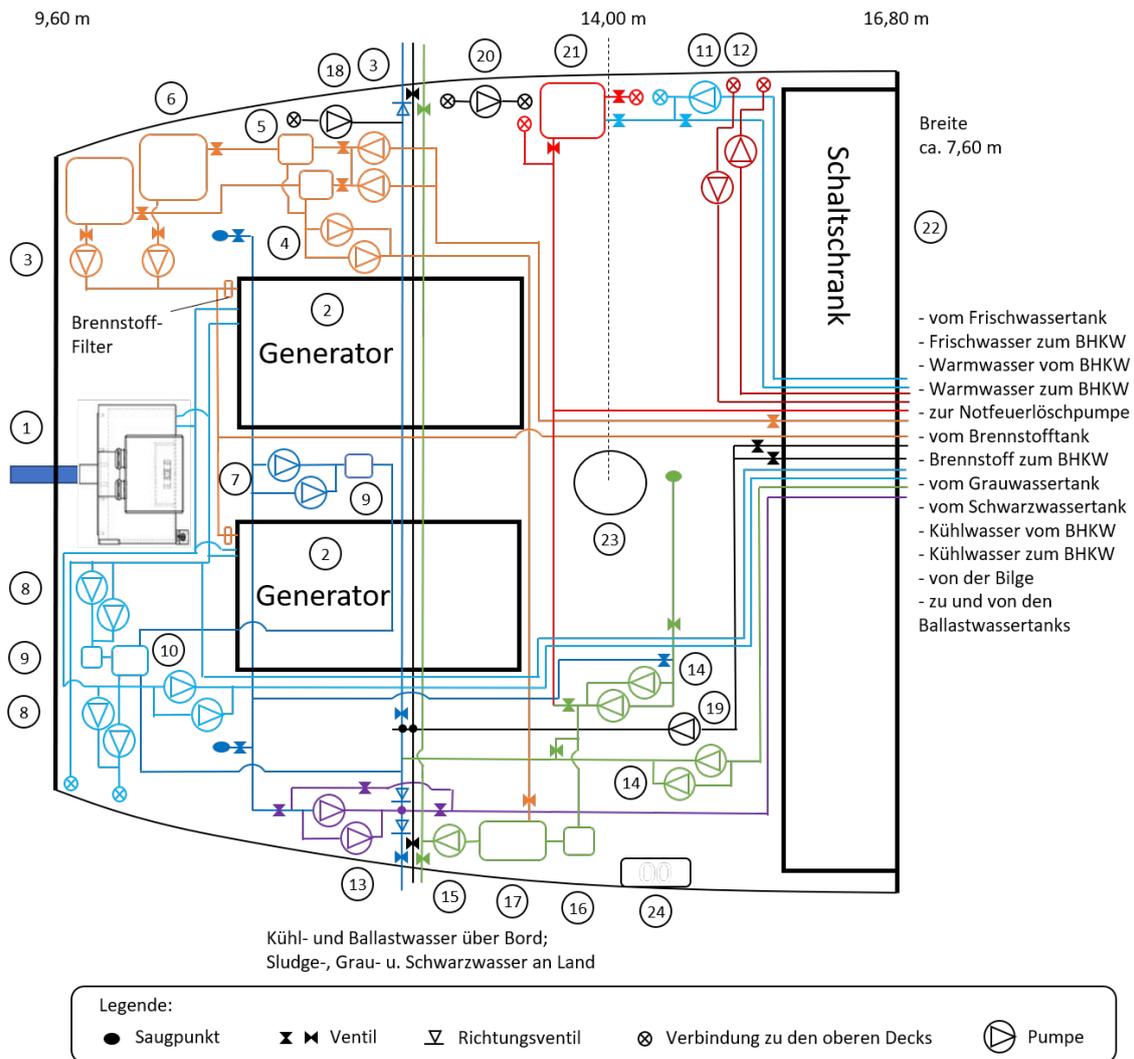


Abbildung 5.65.: Schematische Übersicht der Hauptkomponenten im Maschinenraum

5.2. Maschinenraumkomponenten

Abbildung 5.65 zeigt eine schematische Anordnung der erforderlichen Komponenten im Maschinenraum. Die Nummern im nachfolgenden Text sowie in der Stückliste in Tabelle 5.12 beziehen sich auf die Nummern in Abbildung 5.65. Tabelle 5.13 listet die Komponenten des zweiten Maschinenraums mittschiffs auf.

Über eine Leiter (24) gelangt man über den darüber befindlichen Fitness-Raum in den Maschinenraum. Die notwendige Energie für das Bordnetz und den Antriebsmotor (1) wird mit einer 100 kW Mini-Kraft-Wärme-Kopplung aus der Mittschiffssektion und zwei 200 kW-Dieselelektrogeneratoren (2) erzeugt, die nach Bedarf hinzugeschaltet oder abgeschaltet werden können. Als Antriebsmotor wird ein Elektromotor verwendet, der das Drehmoment über eine Welle ohne Getriebe direkt auf den Propeller überträgt. Die Auslegung des Elektromotors erfolgte in Kapitel 2.4.1.

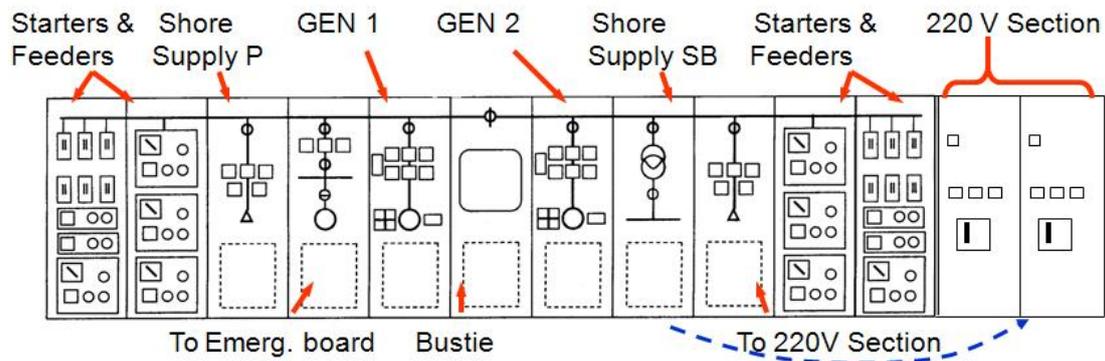


Abbildung 5.66.: Schematische Darstellung eines beispielhaften Schaltschranks (Hakkinen, 2008)

Nach DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch1Sec2.3 müssen alle Komponenten und Systeme redundant ausgelegt werden, die für eine ununterbrochene Funktionalität der aktiven Hauptkomponenten benötigt werden. So muss nach DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8 Sec4.1.1.5 jeder Generator einen zweiten feuergeschützten Schrank im Schaltschrank (22) haben. Nach DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8Sec2 braucht der Notstromgenerator einen eigenen ortsnahen Schaltschrank. Der Schaltschrank kann wie in Abbildung 5.66 aufgebaut sein und würde mit zwei Fächern je Generator in etwa über die gesamte Schiffsbreite gehen. Die Mini-Kraft-Wärme-Kopplung in der Mitte des Schiffes würde ihren eigenen Schaltschrank besitzen. Nach DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch1Sec2.9.2 dürfen sich keine Wärmequellen wie Boiler oder geheizte Servicetanks in der Nähe eines Schaltschranks befinden.

Der Brennstoff und das Frischwasser werden im Hafen über landseitige Pumpen in die jeweiligen großen Tanks gepumpt. Von hier wird der Brennstoff mit einer Pumpe (3) in einen kleineren Servicetank (6) im Maschinenraum gepumpt, wobei er einen Wasserabscheider (5) passiert. Eine zweite Pumpe (3) leitet den Brennstoff vom Servicetank zu den Generatoren. Das im Wasserabscheider gefilterte Wasser-Öl-Gemisch wird mit einer Pumpe (4) zum Sludgetank (17) gefördert. Die Pumpen sind redundant ausgelegt. Gegebenenfalls müssen noch eine Überlaufleitung vom Servicetank zurück zum Bunkertank und ein Rücklauf von nicht verbranntem Diesel von den Generatoren zum Servicetank vorgesehen werden.

Nach DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch6Sec5.4 sollen zwei Brennstoff-Service-Tanks pro verwendetem Brennstofftyp mit ausreichender Kapazität vorhanden sein, um die Hauptsysteme mindestens acht Stunden lang im Normalbetrieb versorgen zu können. An allen Tankein- und -auslässen müssen Absperrhähne vorhanden sein, um ein Auslaufen bei Rohrleitungsbeschädigungen verhindern zu können. Ebenso soll es ein Ventil

zum Brennstofftank nahe des Schotts geben. Jede Hilfsmaschine soll einen eigenen Brennstofffilter haben.

In DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch6Sec2 wird beschrieben, dass Zentrifugal-Seewasser-Kühlpumpen (7) so tief wie möglich im Schiff angeordnet werden sollen, um ein Trockenlaufen zu verhindern. Sie müssen mit mindestens zwei Seekästen verbunden sein, die sich auf beiden Seiten des Schiffes befinden. Sie sind in Abbildung 5.65 durch die beiden Saugstellen rechts und links von den Generatoren dargestellt. Das Seewasser wird zunächst in einer Wasseraufbereitungsanlage (9) gereinigt, um ein Zusetzen des Wärmetauschers (10) zu verhindern. Der Kühlwasserkreislauf besteht aus Frischwasser, welches mit zwei Pumpen (8) ebenfalls durch eine Wasseraufbereitungsanlage (9) und den Wärmetauscher (10) geleitet wird. Es wird angenommen, dass der Druck ausreicht, um das Kühlwasser zu den Generatoren und den E-Motor zu leiten. Um es auch zur Mini-Kraft-Wärme-Kopplung mittschiffs leiten zu können, braucht es eine weitere Kühlwasserpumpe (8). Eine weitere Pumpe wird benötigt, um das Kühlwasser ein Deck höher zur Batterie und zum Umrichter zu befördern.

Statt das Kühlwasser mit Stoffen wie Natriumhypochlorid oder Kupferionen zu versetzen, kann es durch Ultraschall gereinigt werden. Scandlines erprobt derzeit den Einsatz von kleinen Ultraschalleinheiten. So werden „Energiekosten und -verluste durch saubere Kühlleitungen und Wärmetauscher gesenkt. 1 mm Biofilm im Wärmetauscher bedeuten 30 % Energieübertragungsverluste. Filter müssen seltener gewechselt bzw. Filteranlagen seltener rückgespült werden.“ (Greensafer, 2020) Eine andere Möglichkeit der Wasseraufbereitung bietet die hydromechanische Kavitation: „Beschleunigt man beispielsweise ein im Kreislauf geführtes Wasser mit einer geeigneten Hochdruckpumpe immer weiter und lässt es dann in eine speziell geformte Druck- / Reaktionskammer strömen, so kommt es durch die auftretenden hohen Zentrifugal- wie auch Zentripetalkräfte zur Ausbildung von extrem hohen Scher- und Reibungskräften und eines erheblichen Unterdrucks (bis zu -1,0 bar), der schließlich zur Kavitation in der Flüssigkeit führt. Durch diese hohen mechanischen Kräfte werden die Zellmembranen von im Wasser enthaltenen Mikroorganismen aufgerissen und mechanisch zerstört. [...] Nun kommt die chemische Aktivität der eingetragenen Umgebungsluft zur Wirkung: der entstehende Unterdruck saugt die Luft mit einem Venturidüsen-Effekt in die Reaktionskammer, die Kavitationskräfte verursachen hier die Entstehung hochreaktiver Sauerstoffradikale aus dem eingetragenen Luftsauerstoff, die nun in Form einer kalten Oxidation die eingetragenen organischen Zellbestandteile oxidieren und abbauen. Reste des organischen Materials werden über rückspülbare Fein-Filter abgetrennt und das gereinigte Wasser tritt in der zugrunde liegenden Kreislaufführung wieder in den Beschleunigungs- und Kavitationsprozess

ein. Diese mechanischen Filter sorgen auch dafür, dass in dem Kreislauf geführten Wasser keine anorganischen, z.B. silikatischen Verunreinigung eingetragen werden. Dadurch werden Abrasion und andere mechanische Beschädigungen der Bauteile und Ausrüstungen im Rahmen der Durchführung des Kavitationsprozesses wirkungsvoll verhindert.“ (Brück, 2016)

Eine redundant vorhandene Bilgepumpe (14) pumpt die Bilgen des gesamten Schiffes leer und leitet das Wasser über Bord. Die Bilge im Maschinenraum wird über ein separates Rohrsystem mit Ölseparator (16) abgepumpt. Das Ölgemisch wird im Sludgetank (17) im Maschinenraum aufgefangen und mit einer weiteren Pumpe (15) im Hafen abgepumpt. Im Notfall, wenn der Maschinenraum volllaufen sollte, kann das Wasser am Ölseparator vorbei direkt über Bord gepumpt werden. Für diesen Fall werden zwei Pumpen und Auslässe an Backbord und Steuerbord vorgesehen, falls das Schiff stark krängen und sich einer der Auslässe unter der Wasseroberfläche befinden sollte. Somit werden vier Bilgepumpen im Maschinenraum installiert. Zwei weitere können im vorderen Teil des Schiffes installiert werden.

Nach DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch6Sec8 S. 76 berechnet sich die Größe des Sludgetanks nach der folgenden Formel:

$$V = 0,005 \cdot C \cdot D \quad (5.58)$$

Wobei C der tägliche Brennstoffverbrauch und D die Reisezeit in Tagen ist. Die Reisezeit ist mit nicht weniger als 30 Tagen anzusetzen, sofern das Schiff keiner beschränkten Service-Notation unterliegt. Weiter oben wurde beschrieben, dass der GreenSailer bei voller Rotor-Drehzahl 283 kW/h benötigt. Es wurde angenommen (konservativ), dass der GreenSailer zehn Stunden am Tag bei voller Rotor-Drehzahl fährt. Daraus ergab sich ein Brennstoffverbrauch von 552 l. Somit muss der Sludgetank 83 l fassen. Da die maximale Reisezeit des GreenSailers auf 14 Tage ausgelegt wurde, sind auch etwaige Schlechtwetterfahrten mit der Dimensionierung des Tanks auf 30 Tage abgedeckt.

Vom großen Frischwassertank wird das Trinkwasser mit der Frischwasserpumpe (11) zu den Verbrauchern gepumpt. Der unter Druck stehende Feuerlöschtank (21), aus welchem das Sprinklersystem gespeist wird, wird ebenfalls mit Frischwasser gefüllt, um Salzwasser im System zu vermeiden. Sollte die gespeicherte Wassermenge nicht ausreichen, können die Bilgepumpen (14), die dann als Feuerlöschpumpen dienen, Seewasser zuführen. Außerdem pumpen sie das Seewasser zu den Entnahmestellen

an Deck. Die Notfeuerlöschpumpe soll an einem anderen geschützten Ort untergebracht werden, in dem sich auch die Energieversorgung für die Notfeuerlöschpumpe befindet, dies kann im Pumpenraum im Bug sein.

Das durch die Mini-Kraft-Wärme-Kopplung erhitzte Wasser wird über eine Pumpe (12) zu den Heizkörpern, der Kombüse und anderen Abnehmern gepumpt. Eine Membranpumpe (18) kann das Wasser abpumpen, welches sich in den Kettenkästen gesammelt hat. Die Ballastwasserpumpe (13) entnimmt das Wasser den Seekästen und pumpt es in die Ballastwassertanks. Die Ventile können so geschaltet werden, dass dieselbe Pumpe das Ballastwasser auch aus den Tanks heraus und über Bord pumpen kann. Die Grau- und Schwarzwasserpumpe (19) pumpt das Schmutzwasser an Land oder notfalls über Bord, wenn die Tanks voll sein sollten. Die Abwasserpumpe (20) stellt den Unterdruck für das Sanitärsystem her. Eine Ersatzpumpe sollte an anderer Stelle gelagert werden.

Des Weiteren befinden sich eine Werkbank mit einer Bohrmaschine, ein Regal und zwei Feuerlöscher im Maschinenraum. An der Decke laufen Luftschächte entlang, die Frischluft zuführen und die Abgase der Motoren abführen.

Alle Tanks haben nicht nur Rohrleitungsanschlüsse und Armaturen zum Füllen und Entleeren, sondern auch Entlüftungsröhre, die bis zum Oberdeck und darüber hinaus reichen, sowie Überlaufeinrichtungen, um zu verhindern, dass die Tanks bei Erreichen des oberen Füllstandes durch den Pumpendruck bersten. Die Überlaufleitungen führen wiederum zu Tanks, die hier in dieser Übersicht nicht weiter dargestellt sind. Hinzu kommen die Betriebsstoff-Auffangwannen unter einigen Tanks, von denen wiederum Leitungen zu einem Auffangtank führen.

Anfallender Müll wird an Bord nach Stoffgruppen getrennt gesammelt und im Hafen fachgerecht entsorgt.

Aus dem Gespräch mit Herrn Heimhold (2020) ergab sich folgender Nachtrag: Anstelle des Wasserabscheiders (5) könnte besser ein Separator zum Abscheiden von Wasser und Verunreinigungen verwendet werden. Das Abgeschiedene läuft durch die Schwerkraft in den tiefer gelegenen Sludge-Tank, sodass keine Pumpe (4) dafür benötigt wird. Es sollte möglichst kein Seewasser ins Schiff geholt werden, um Korrosion und folgende Austauscharbeiten zu vermeiden. Daher sollte die Toiletten-Spülung mit Frischwasser erfolgen und der Kühlkreislauf sollte nur aus einem Frischwasser-Kreislauf mit Kastenkühlern in den Seekästen bestehen. Besser wären zudem luftgekühlte 200 kW-Generatoren, sodass das Schiff auch trockenfallen kann. Das Ballast-

wasser muss beim Tauschen behandelt werden können. Eine 20 kW-Elektrolyse nur beim Reinpumpen ist in den Folgekosten günstiger als UV-Lampen, welche einen hohen Stromverbrauch und eine kurze Lebenszeit haben und als Gefahrgut entsorgt werden müssen. Die Bilge-Pumpe zum Lenzen des Maschinenraums kann entfallen, wenn diese Funktion eine General service pump oder die Ballastwasserpumpe übernehmen kann. Für das Auspumpen des Kettenkastens sollte keine Membranpumpe verwendet werden, da sie sehr langsam ist und Druckluft benötigt. Der Kettenkasten kann stattdessen ans Ballastwassersystem angeschlossen werden.

5.2.1. Pumpenauslegung

Im Folgenden werden die Bilgepumpe, Kraftstoff- und Kühlwasserpumpe ausgelegt.

Bilgepumpe

Die Auslegung der Bilgepumpe erfolgt nach DNVGL-RU-SHIP Pt.4 Ch.6.Sec.4. Der innere Rohrdurchmesser d berechnet sich zu:

$$d = 1,68 \cdot \sqrt{L(B + D)} + 25 = 1,68 \cdot \sqrt{58,25m(11,40m + 4m)} + 25 = 75,32mm \quad (5.59)$$

Wobei D die Höhe vom Kiel bis zum Schott-Deck ist. Die notwendige Pumpenkapazität Q beträgt nach der folgenden Formel 32,62 m³/h:

$$Q = 5,75 \cdot d^2/1000 \quad (5.60)$$

Kraftstoffpumpe

Es wird angenommen, dass der Dieselverbrauch eines 200 kW-Generators bei 200 g/kWh liegt. Der Verbrauch V_{kW} des Generators kann mit dem spezifischen Verbrauch V_{spez} des Motors, der Kraftstoffdichte $\rho = 0,82kg/l$, einem angenommenen Wirkungsgrad $\eta_{Gen} = 0,9$ und der benötigten elektrischen Leistung P_{el} berechnet werden (MagnaGen GmbH, 2020):

$$V_{kW} = \frac{V_{spez}}{\rho \cdot \eta_{Gen}} \cdot P_{el} \quad (5.61)$$

Es ergibt sich ein Verbrauch von ca. 54 l/h für einen Generator. Wird der Verbrauch der Mini-Kraft-Wärme-Kopplung genauso berechnet, so benötigen sie und beide Generatoren zusammen etwa 136 l/h unter Vollast, was eine Pumpenkapazität von 0,14 m³/h entspricht. Somit muss jeder Service-Tank für acht Stunden Fahrbe-

trieb 1,08 m³ fassen. Wenn beide Service-Tanks gefüllt sind, könnte der GreenSailer theoretisch 16 Stunden bei Schlechtwetter durchfahren. Nach Formel 5.60 muss der Durchmesser der Hauptkraftstoffleitung mindestens 5 mm betragen.

Kühlwasserpumpe

Nach (Mettig, 1973) berechnet sich die zu fördernde Wassermenge V_W nach der abzuführenden Wärmemenge q_W und der zulässigen Temperaturdifferenz Δt zwischen Wassereintritt in den Motor und Wasseraustritt aus dem Motor:

$$V_W = \frac{q_W \cdot N_e}{1000 \Delta t} \quad (5.62)$$

N_e ist die Nennleistung des Motors in PS. Für die abzuführende Wärmemenge q_W gibt (Mettig, 1973) 400 kcal/PS_h für aufgeladene Dieselmotoren mit direkter Einspritzung an. Die Temperaturdifferenz Δt beträgt 5-7 °C. Für die weiteren Berechnungen wurde ein Mittelwert von 6 °C angenommen. Mit einer Gesamtleistung N_e von 500 kW bzw. 367,65 PS ergab sich eine zu fördernde Kühlwassermenge von 24,51 m³/h. Nach Formel 5.60 musste der Durchmesser der Kühlwasserleitung mindestens 65,3 mm betragen. Hinzu kam, dass auch die Batterie und der Umrichter gekühlt werden mussten.

Für die Auslegung einer Pumpe mussten außerdem die Pumpendrehzahl und der Förderdruck bekannt sein. Dabei wurden die Entfernung der Kühlanlage, zusätzliche Wärmetauscher, Thermostate und Krümmer in den Leitungen auf die Förderhöhe angerechnet, die dann bei größeren Motoren 25-30 m betragen kann (Mettig, 1973).

Tabelle 5.12.: Systeme und Komponenten im Hauptmaschinenraum

Nr.	Anzahl	System mit Komponenten
		Propulsion
1	1	- E-Motor
2	2	- Generator
		Brennstoffzufuhr
3	4	- Brennstoffpumpe
4	2	- Sludge-Pumpe
5	2	- Wasserabscheider
6	2	- Servicetank
17	1	- Sludgetank
		Kühlung
7	2	- Seewasser-Kühlpumpe
8	6	- Frischwasser-Kühlpumpe
9	2	- Wasseraufbereitungsanlage
10	1	- Wärmetauscher
		Frischwasserversorgung
11	1	- Frischwasserpumpe
12	1	- Warmwasserpumpe
		Ballastwasser
13	2	- Ballastwasserpumpe
		Bilge
14	4	- Bilgepumpe
15	1	- Sludge-Transferpumpe
16	1	- Ölseparator
17	1	- Sludgetank
		Abwasser
18	1	- Membranpumpe
19	2	- Grau- und Schwarzwasserpumpe
20	1	- Abwasserpumpe
		Brandbekämpfung
14	2	- Hauptfeuerlöschpumpe
21	1	- Feuerlöschtank
	2	- Feuerlöscher
		Sonstiges
22	1	- Schaltschrank
23	1	- Besan-Mast
24	1	- Zugangsleiter
	1	- Werkbank
	1	- Bohrmaschine
	1	- Regal

Tabelle 5.13.: Systeme und Komponenten im zweiten Maschinenraum mittschiffs

Anzahl	System mit Komponenten
1	Mini-Kraft-Wärme-Kopplung
1	Schaltschrank
	Druckluft
1	- Kompressor
1	- Druckluftbehälter

5.3. Brückengestaltung

Das Layout der Brücke wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (ZITAT) nach den Anforderungen von SOLAS und IMO entworfen. Dabei wurden die Sichtachsen entlang der Masten genau geprüft. Die einzelnen Arbeitsplätze sind hinsichtlich der zu bedienenden Geräte und der Ergonomie angeordnet und vermessen worden. Es ist ein 3D-Modell entstanden, das in Abbildung 5.67 dargestellt ist. Es kann auch im Blended Learning-Modul in der Virtual Reality zu Schulungszwecken im AP 7 verwendet werden.

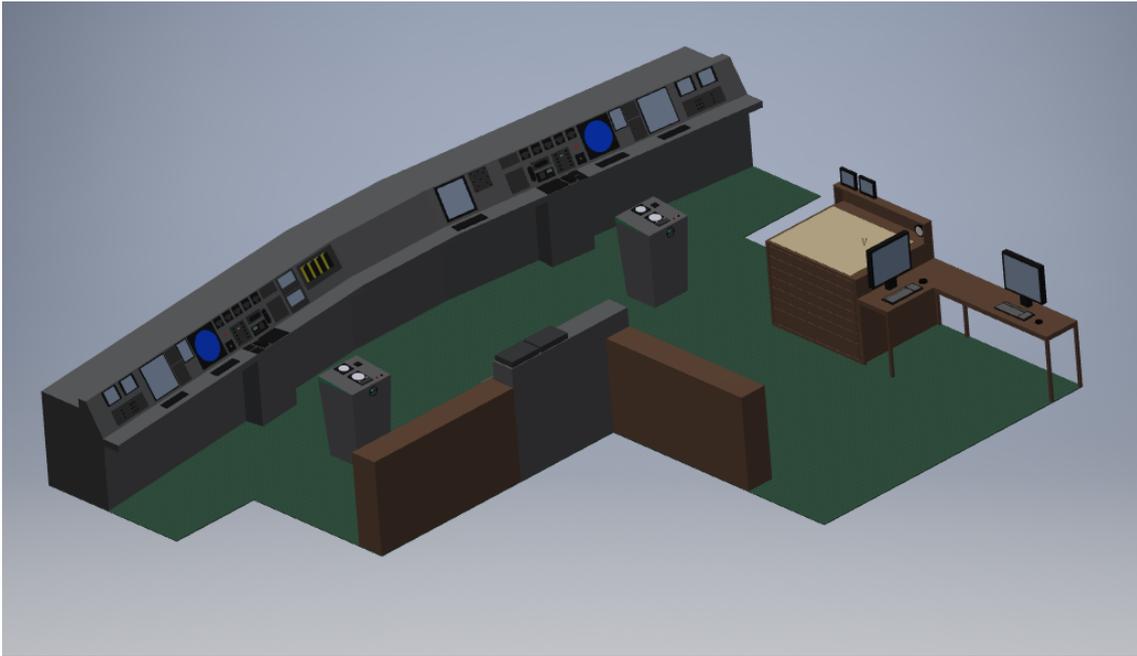


Abbildung 5.67.: Entwurf der Brückengestaltung (Besserer, 2016)

5.4. Forschungseinrichtungen

Durch seinen leisen und teilweise emissionsfreien Betrieb ist der GreenSailer ideal für besondere Forschungsaufgaben geeignet. Hierzu ist der Entwurf des Schiffes entsprechend angepasst worden und kann multifunktional genutzt werden. Je nach Schwerpunkt der Verwendung kann der Basisentwurf des GreenSailers auch direkt ab Werft entsprechend modifiziert werden.

Die vorgesehene Ausstattung orientiert sich dabei an Forschungsschiffen ähnlicher Größenordnung sowie an den auf Forschungsfahrten des Fachbereiches gewonnenen Erfahrungen. Als Vergleichsschiffe wurden z.B. die *Littorina* des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, die *Ludwig Prandtl* des Helmholtz-Zentrum Geesthacht und der *Solea* des Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut als moderner Neubau hinzugezogen. Zusätzlich bestand die Möglichkeit für die Projektmitarbeiter, während einer Werftliegezeit in Emden, eine ausführliche Besichtigung auf Deutschlands modernstem Forschungsschiff, der *Sonnevorzune* und im Austausch mit den Mitarbeitern des Fachbereiches sowie der Vertretung der Bereederung gelungene Ausstattungsmerkmale zu identifizieren.

Nachfolgend wird auf die wichtigsten Ausstattungsmerkmale für den Forschungsbetrieb eingegangen.

5.4.1. Mehrzweckraum

Der GreenSailer soll über einen Mehrzweckraum verfügen, der als Labor genutzt werden kann. Dieser Raum sollte als Nassraum ausgelegt werden um die Reinigung möglichst einfach zu gestalten. Als Basisausstattung für eine sinnvolle und modulare Nutzung sollte folgendes bereitstehen:

- Schienensysteme an Decken und Wänden für eine modulare Ausstattung und Kabelwege
- Stromversorgung, 1- und 3-phasig, gepuffertes IT-Netz
- Netzwerkanschlüsse zum Forschungs-/Schiffsnetz
- Fließend Kalt- und Warmwasser, Abfluss (Chemikalen Entsorgung?)
- helle, blend- und schattenfreie Grundausleuchtung. Optional mit Farbtemperaturregulung („Human Centric Lighting“)

Zusätzlich zu den vorhandenen Einrichtungen könnte, wie auf anderen Forschungsschiffen auch, der GreenSailer durch zusätzliche Laborcontainer je nach Forschungsaufgabe erweitert werden. Dadurch wäre eine schnelle Umrüstung des Schiffes von einem kommerziellen Ladungstransport zu einer Forschungsfahrt möglich. Auch der

parallele Transport von Gütern zu Forschungseinrichtungen wäre denkbar.

5.4.2. Kräne und Winden

Sollte das Schiff überwiegend als Forschungsschiff genutzt werden, kann ein Ausziehbalken am Aufbau oder Mitschiffs installiert werden, um Geräte mit Abstand zur Bordwand geführt und schonend zu Wasser lassen zu können.

Um Messequipment oder Markierungsbojen an exakter Stelle ausbringen und verankern zu können, ist an einer Schiffsseite ein sogenannter Delta-Haken vorgesehen. Diese Einrichtung wird z.B. auch bei Tonnenlegern genutzt und ermöglicht es, eine Last (z.B. Ankergewichte) an einer Kette zu fixieren und bei Erreichen der exakten Position augenblicklich zu slippen. Hierfür ist in der Nähe eine ausreichende Deckfläche wichtig, um dort die weitere Kette in Buchten auszulegen. Das Deck ist in diesem Bereich idealerweise durch einen austauschbaren Holzbelag zu schützen und mit einer steckbaren Reling auszustatten.

Im Mitschiffsbereich verfügt der GreenSailer über eine fest installierte Einleiterwinde mit etwa 150 m Kapazität. Dies ist für Forschungsaufgaben in der Nordsee und ähnlichen Küstenmeeren ausreichend.

5.4.3. Mehrzweckboot

Um auch in Flachwasserbereichen forschen zu können und gegebenenfalls schwimmendes Equipment besser aufnehmen zu können, soll der GreenSailer über ein entsprechendes Arbeitsboot verfügen. Dieses soll am Heck oder mittschiffs mitgeführt werden. Für eine zweckmäßige Ausstattung bzw. Größe kann auf das am Fachbereich verfügbare Festrumpfschlauchboot *Stokes* verwiesen werden. Es wird für kleine Forschungstätigkeiten in der Nordsee genutzt und wird auch zu Forschungsreisen anderer Schiffe beigesteuert.

5.4.4. Sonstige Ausstattung

Für die multifunktionale Nutzung empfiehlt sich die Vorbereitung einzelner Mess- und Sensorplätze. Diese bestehen aus einem Fundament sowie der Bereitstellung einer Stromversorgung und Datenanschlüssen. Folgende Orte werden vorgeschlagen: In wasserdichter Ausführung oder in passendem Gehäuse (z.B. Rittal) untergebracht:

- mindestens 4 Netzwerkanschlüsse

Tabelle 5.14.: Forschungsfundamente

Position	Größe	SWL
Backdeck	ca. 120 x 80 cm	100 kg
Mastspitze	ca. 15 x 15 cm	5-10 kg
Peildeck	ca. 60 x 80 cm	50 kg
Achterdeck	ca. 60 x 80 cm	100 kg

- 230 V Steckdosen

Um (Heiß-)Arbeiten am Schiff zu vermeiden, werden passende Aufnahmen z.B. in Form von gebogenem Flachstahl mit Langlöchern vorgesehen. Damit kann das benötigte Equipment einfach aufgeschraubt und nach Ende des Einsatzes wieder demontiert werden.

Wünschenswerte Merkmale

Bei einem höheren Anteil des Forschungsbetriebes wäre ein größeres ebenes Arbeitsdeck vorteilhaft. Hierzu besteht die Option, den GreenSailer mit nur einem Frachtraum auszustatten und somit freie Decksfläche sowie unter Deck zusätzlichen Platz für Lager und Laboreinrichtungen zu gewinnen.

AP 6: Schiffssicherheit und Beladungstechnik

Zur Schiffssicherheit gehören Rettungseinrichtungen und Feuerlöscheinrichtungen, die im Folgenden auf die Größe des GreenSailers ausgelegt und beschrieben werden. Am Ende des Kapitels werden mögliche Beladungstechniken aufgeführt.

6.1. Schiffssicherheit

Um den Anforderungen eines umweltfreundlichen Schiffes gerecht zu werden, bedarf es eines sicheren Schiffsbetriebes. Jeder Unfall, sei er das Schiff oder die Ladung betreffend, kann zu einer Freisetzung von schädlichen Stoffen und damit zu einer Schädigung der marinen Umwelt führen. Auch eine bloße Reparatur des Schiffes oder seiner Komponenten bedarf zusätzlicher, vermeidbarer Ressourcen. Der GreenSailer soll daher eine erhöhte Schiffssicherheit gegenüber den gesetzlichen Anforderungen aufweisen. Dies wurde insbesondere durch die dezentrale und redundante Energieerzeugung an Bord gewährleistet. Zusätzlich zum maschinellen Hauptantrieb kann das Schiff natürlich auch ausschließlich über die Segelantriebe fortbewegt werden. Gegenüber einem konventionellen Schiff ist dadurch ein zusätzliches Vortriebsorgan gegeben. Weiterhin ist die sichere Führung des Schiffes durch gut ausgebildetes und an Bord geschultes Personal besonders wichtig. An dieser Stelle wird auf das entsprechende Ausbildungskonzept in Kapitel 6.2 verwiesen.

Der Nachweis der Intakt- und Leckstabilität für ein sicheres Verhalten im Seegang und bei Unfällen wurde im Kapitel 2.6 geführt.

Nach dem IMO Code of Safety for Special Purpose Ships, Kapitel 6, können für Schiffe mit weniger als 60 Personen die Feuerschutzanforderungen von Kapitel II-2 der SOLAS für Frachtschiffe angewendet werden.

Die folgenden Angaben zu den Rettungs- und Brandschutzeinrichtungen wurden der Bachelorarbeit von Quignon (2017) entnommen. Dort wurde eine detailliertere Beschreibung der Ausrüstung und weitere Pläne zur Unterbringung an Bord erstellt.

6.1.1. Rettungseinrichtungen

Um die Sicherheit der Mannschaft und des Spezialpersonals an Bord zu gewähren, werden folgende Dinge benötigt: Drei UKW- Sprechfunkgeräte, von denen eines in einem Überlebensfahrzeug untergebracht werden kann. Zwei Ortungsgeräte, die jeweils an Backbord und an Steuerbord so untergebracht werden müssen, dass sie leicht in das Überlebensfahrzeug mitgenommen werden können. Das Emergency Position Indicating Radio Beacon (EPRIB) muss so hoch wie möglich platziert werden, damit es gut aufschwimmen kann. Somit kann das EPRIB gut an der oberen Stelle der am Achterdeck befindlichen Masten befestigt werden. Falls dies nicht möglich ist, kann das EPRIB auch auf dem Dach der Kommandobrücke befestigt werden. Es ist empfohlen es so anzusiedeln, dass es im Notfall mit in eines der Überlebensfahrzeuge genommen werden kann, wo es an einer Schwimmleine befestigt werden würde. Die SART-Geräte (Search and Rescue Transponder) werden standardmäßig Steuerbord und Backbord auf der Kommandobrücke untergebracht. Des weiteren müssen zwölf Fallschirm- Leuchtraketen in der Kommandobrücke oder in deren Nähe für den Notfall aufbewahrt werden. Dort kann auch das Leinenwurfgerät untergebracht werden.

Eine Bord-Wechselsprech- und Alarmanlage wird benötigt, um zwischen den Notkontrollstation, den Sammelplätzen und den Einbootungsstationen zu kommunizieren und den Ablauf der Rettungsaktionen zu besprechen oder Befehle auszutauschen. Diese Notrufanlage kann modil oder ortsfest installiert werden. Zusätzlich zu der Bord- Wechselsprechanlage muss ein Alarmsystem an Bord eingebaut werden, um Fahrgäste und Mannschaft zu warnen. Dieses Alarmsystem muss in Unterkunftsräumen und in allen üblichen Arbeitsräumen der Besatzung hörbar sein. Wenn das Generalalarmsystem eingesetzt wird, müssen sich automatisch Unterhaltungs- und Tonanlagen abschalten.

Zu den persönlichen Rettungsmitteln gehören Rettungsringe, die an Bord verteilt angebracht werden müssen. Insgesamt werden acht Rettungsringe an Bord des GreenSailers benötigt. Vier dieser Rettungsringe müssen mit einem schwimmfähigen Licht ausgestattet sein. Von diesen vier Rettungsringen mit schwimmfähigem Licht müssen wiederum mindestens zwei mit Rauchsignalen ausgestattet sein. Die Unterbringung der Rettungsringe mit Rauch und Licht soll sich in der Nähe der Kommandobrücke befinden, damit diese von dort leicht eingesetzt werden können. Des weiteren werden zwei Rettungsringe mit einer Schwimmleine an Bord benötigt, wovon je einer pro Seite des Schiffes angebracht werden soll. Auch zwei einfache Rettungsringe ohne zusätzliche Rettungsmittel sollen an Bord des GreenSailers mitgeführt werden. Die Unterbringung der Rettungsringe könnte so gestaltet werden, dass auf

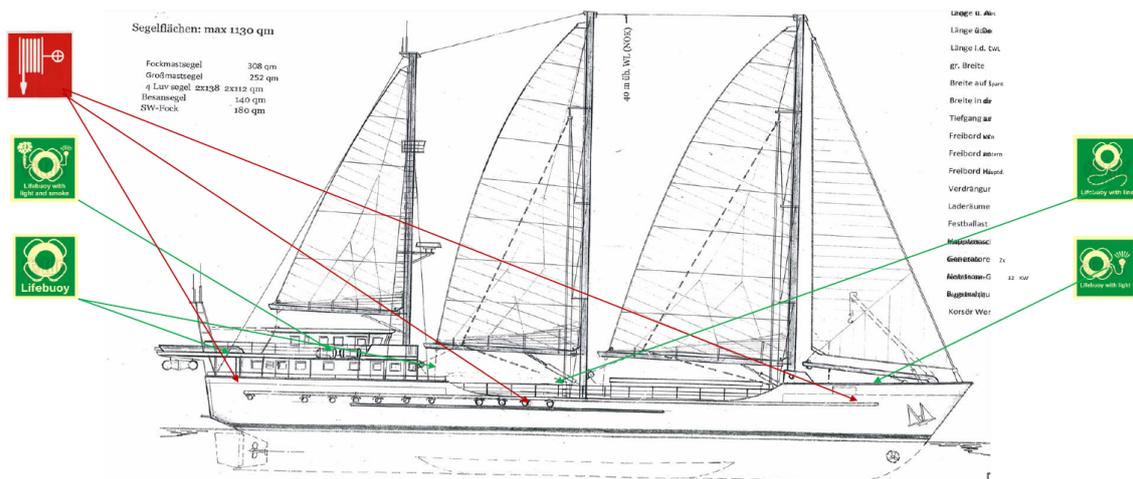


Abbildung 6.68.: Mögliche Anordnung der Rettungsringe

dem Hauptdeck achtern ein normaler Rettungsring, Steuerbord und Backbord an der Kommandobrücke die Rettungsringe mit Licht und Rauch, an der Frontseite der Aufbauten wieder ein normaler Rettungsring, mittschiffs an der Reling je Steuerbord und Backbord ein Rettungsring mit Leine, sowie im Bug Steuerbord und Backbord ein Rettungsring mit Licht verteilt werden. Diese mögliche Anordnung ist in Abbildung 6.68 dargestellt.

Die Anzahl der mitgeführten Rettungswesten muss mindestens der Anzahl der Passagiere und Besatzung an Bord entsprechen. Das heißt, an Bord des GreenSailers werden mindestens 21 Rettungswesten benötigt. Die Rettungswesten müssen so untergebracht und gekennzeichnet sein, dass sie von Personal und Fahrgästen leicht aufzufinden sind. Auch müssen zusätzliche Rettungswesten an entfernt gelegenen Wachstationen wie im Maschinenwachraum, Brücke und Wachstationen untergebracht werden.

Zusätzlich muss für jede Person, die sich an Bord befindet, ein Eintauchanzug an Bord sein. Zudem muss dafür Sorge getragen werden, dass für jedes Besatzungsmitglied des Bereitschaftsbootes ein Eintauch- oder Wetterschutzanzug vorhanden ist. Die Anzüge und weitere Sicherheitsmittel könnten in einem Lagerraum auf dem Kabinendeck untergebracht werden, der somit zum Safetystore wird. Des weiteren können sechs Eintauchanzüge im Bug in einer der Backskisten untergebracht werden. Die Unterbringung der weiteren sechs Eintauchanzüge dient dazu, im Falle eines Einsatzes mit dem Bereitschaftsboot die Eintauchanzüge direkt vor Ort zu haben. Es muss beachtet werden, dass die Eintauchanzüge in verschiedenen Größen vorhanden sind.

Zusätzlich zu dem vorgeschriebenen Bereitschaftsboot werden vier Rettungsflöße benötigt. Diese Rettungsflöße müssen in der Lage sein, bei Verlust oder Beschädigung eines Rettungsflöses, die gesamten Personen an Bord aufzunehmen. Um die vier Rettungsflöße möglichst so zu stauen, dass sie schnell erreicht werden können, und gesichert ist, dass Ersatz vorhanden ist, werden der Platz zwischen Laderaum und Aufbauten, sowie vorn im Bug empfohlen. Von diesen Stellen aus können die Rettungsflöße gut nach Steuerbord und Backbord transportiert und über Bord geworfen werden.

6.1.2. Feuerlöscheinrichtung

Das fest eingebaute Feuermelde- und Feueranzeigesystem muss dem SOLAS Kap. II-2 Regel 7 sowie dem International Code for Fire Safety Systems (FSS-Code) entsprechen.

Um die Zielsetzung zu erreichen, muss das Schiff senkrechte Hauptbrandabschnitte sowie waagerechte Brandabschnitte vorweisen. Die baulichen Trennflächen müssen wärmedämmend sein. Zudem müssen die Unterkunftsräume vom Rest des Schiffes durch wärmedämmende und bauliche Trennung geschützt werden. Um den Brand bereits im Raum seiner Entstehung löschen zu können, wird ein Feuermelde- und Feueranzeigesystem benötigt. Die Vorschriften zu den Feuermelde- und Feueranzeigesystemen sagt aus, dass in allen Treppenschächten, Gängen und Fluchtwegen innerhalb der Unterkunftsräume Rauchmelder angebracht sein müssen. Die Anordnung der Rauchmelder richtet sich nach SOLAS Kap. II-2 Regel 5.5.1. Das Feuermelde- und Feueranzeigesystem sollte nach Methode IIC oder IIIC ausgelegt sein, sodass es Unterkunftsräume, Küchen und andere Wirtschaftsräume mit Ausnahme der Räume, in denen keine wesentliche Brandgefahr besteht, wie Leerräume, Sanitätsräume usw., schützt. Außerdem muss ein fest eingebautes Feuermelde- und Feueranzeigesystem so eingebaut und angeordnet sein, dass es Rauch in allen Gängen, Treppenhäusern und in Fluchtwegen innerhalb der Unterkunftsräume anzeigt. Auf Frachtschiffen, welche die Methode IIC anwenden, muss ein selbsttätiges Berieselungs-, Feuermelde- und Feueranzeigesystem eingebaut sein.

Das Feueranzeigesystem in einem unbesetzten Maschinenraum kann ein fest eingebautes Gas-, Leichtschaum- oder Druckwasser-Sprühfeuerlöschsystem sein. Zusätzlich zu dem Feuermelde- und Feueranzeigesystem werden verschiedene Feuerlöscher im Maschinenraum benötigt. Diese stellen sich zusammen aus drei tragbaren Schaumlöscheinheiten und so vielen fahrbaren Schaumlöscheinheiten mit je 45 l Inhalt oder gleichwertige Feuerlöscher, um jede Stelle des Brennstoff- oder Schmieröl-

drucksystems innerhalb von 10 m zu erreichen. Zusätzlich muss ein Eimer mit 0,3 m³ in Soda getränktem Sägemehl oder ein tragbarer Feuerlöscher bereitstehen.

Wenn für den Maschinenraum ein CO₂-Feuerlöschsystem gewählt wird, muss hierfür ein gesonderter Raum bereitgestellt werden. Dies bedeutet, dass z.B. der Fitnessraum oder auch der Batterieraum etwas kleiner ausfallen müssen, um den zusätzlichen Raum Bedarf zu decken. Auch im Maschinenraum in der Mittelsektion müsste ein solcher Raum eingerichtet werden, um die CO₂-Flaschen sowie die Bedienelemente unterbringen zu können. Des weiteren werden für den Maschinenraum tragbare Feuerlöscher benötigt. Die Vorschrift besagt, dass kein Weg zu einem Feuerlöscher länger als 10 m sein darf. Der hintere Maschinenraum hat bis zum Stopfbuchsen-schott eine Länge von 7,20 m. Somit sollten zwei Feuerlöscher mit ABC-Pulver befüllt ausreichend sein, einer Steuerbord und einer Backbord. Zudem muss der fahrbare Schaumlöscher hinzugezählt werden. Auch ein Feuerlöschschlauch mit 15 m Länge und ein passendes Strahlrohr werden benötigt, was direkt neben der Hauptfeuerlöschpumpe platziert werden kann.

Um den Brandschutz an Bord zu gewährleisten, werden eine Hauptfeuerlöschpumpe sowie eine Notfeuerlöschpumpe benötigt. Die Hauptfeuerlöschpumpe darf im Maschinenraum untergebracht werden, die Notfeuerlöschpumpe muss an einem anderen geschützten Ort untergebracht werden, in dem sich auch die Energieversorgung für die Notfeuerlöschpumpe befindet. Dies kann der Pumpenraum im Bug sein. Des weiteren werden an Bord des GreenSailers mindestens vier Feuerlöschschläuche benötigt, da pro 30 m Schiffslänge ein Schlauch vorgeschrieben ist, plus ein Feuerlöschschlauch für den Maschinenraum. Diese Schläuche müssen in unmittelbarer Nähe zu den Schlauchkupplungen untergebracht werden. Die Schlauchkupplungen sollen untereinander austauschbar sein. Zu den Feuerlöschschläuchen müssen zudem die passenden Strahlrohre vorhanden sein.

Um den Brandschutz im restlichen Schiff sicher zu stellen, werden in geringen Abständen tragbare 6 kg ABC-Pulverlöscher in den Räumlichkeiten untergebracht. In Unterkunftsräumen dürfen diese nicht mit Kohlendioxid befüllt sein. Auf der Brücke sollten nach Abbildung 6.69 zwei Feuerlöscher zur Verfügung gestellt werden. Diese können Steuerbord und Backbord an den Seitenwänden angebracht werden. Zudem sollte ein weiterer Feuerlöscher achtern am Ausgang angebracht werden, um die Kapitänskajüte, den Navigationsraum und die dort geplante Sitzecke zu schützen. Um das Brückendeck vor einem großflächigen Brand zu schützen, wird ein Anschlussstutzen mittig am achterlichen Außengeländer geplant. Mit einem Feuerlöschschlauch, der im Safetystore gelagert wird, können das Steuerhaus von innen sowie die Brücke

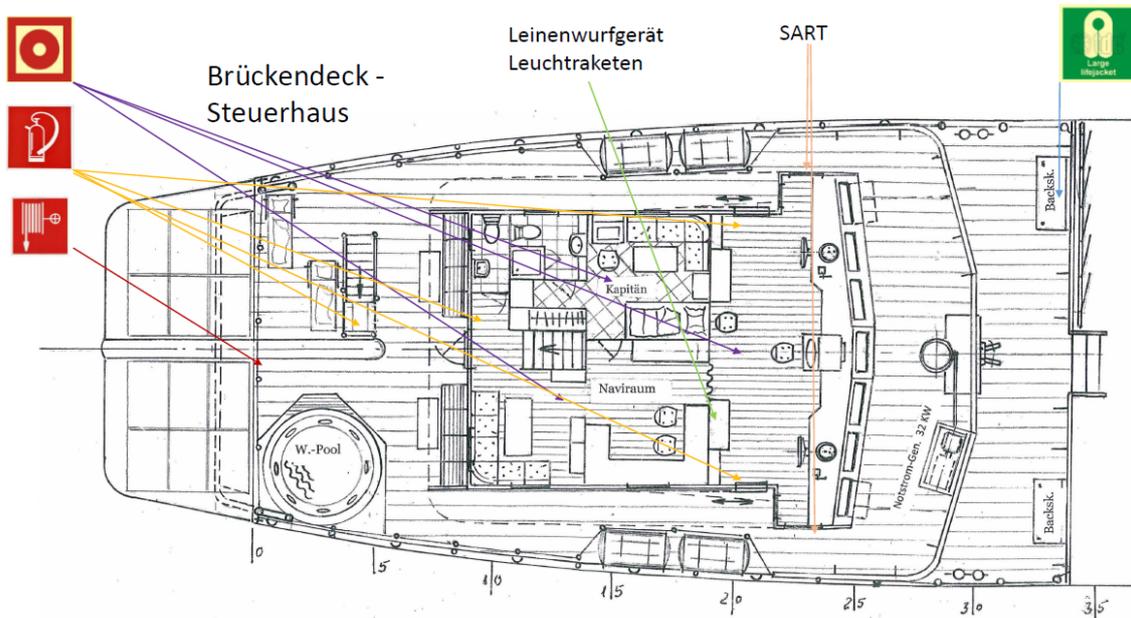


Abbildung 6.69.: Sicherheitseinrichtungen auf dem Brückendeck

von außen mit dem Schlauch geschützt werden.

Um die Messe bzw. den Salon schützen zu können, muss wie in Abbildung 6.70 gezeigt an den Seiteneingängen jeweils ein Feuerlöscher angebracht werden. Dem Hospital und der Bibliothek sollen eigene Feuerlöscher zur Verfügung stehen, welche ebenfalls neben der Tür angebracht werden können. Zusätzlich müssen in jedem Raum Feuermelder an den Decken angebracht werden, die an das Feuermelde- und Feueranzeigesystem angeschlossen sind. Ein Anschlussstutzen im Feuerlöschkasten mit integriertem Schlauch kann an der gleichen Position wie im Wohndeck darunter angebracht werden, sodass die Anschlüsse einfach mit einer Steigleitung verbunden werden können. Von diesem Punkt aus können alle Räumlichkeiten gut erreicht werden.

Um das Wohndeck zu schützen, werden wie in Abbildung 6.71 zwei bis drei 6-kg ABC-Löcher verteilt. Für den Fall, dass ein Brand nicht sofort bemerkt wird, wird ein Feuerlöschkasten mit integriertem Schlauch neben dem Anschlussstutzen beim Treppenaufgang bzw. neben der Tür zum Konferenzraum installiert. Da ein Feuerlöschschlauch 20 m lang ist, kann damit jede Kajüte erreicht werden, um den Brand darin löschen zu können. Somit wird ein schnelles Eingreifen der Mannschaft und des Spezialpersonals ermöglicht. Zudem müssen im Flur und in jeder Kajüte Feuermelder angebracht werden, die an das Feuermelde- und Feueranzeigesystem angeschlossen sind. Somit kann die Brandentwicklung schnell erfasst werden und ein schnelles Eingreifen in die Gefahrensituation geschehen.

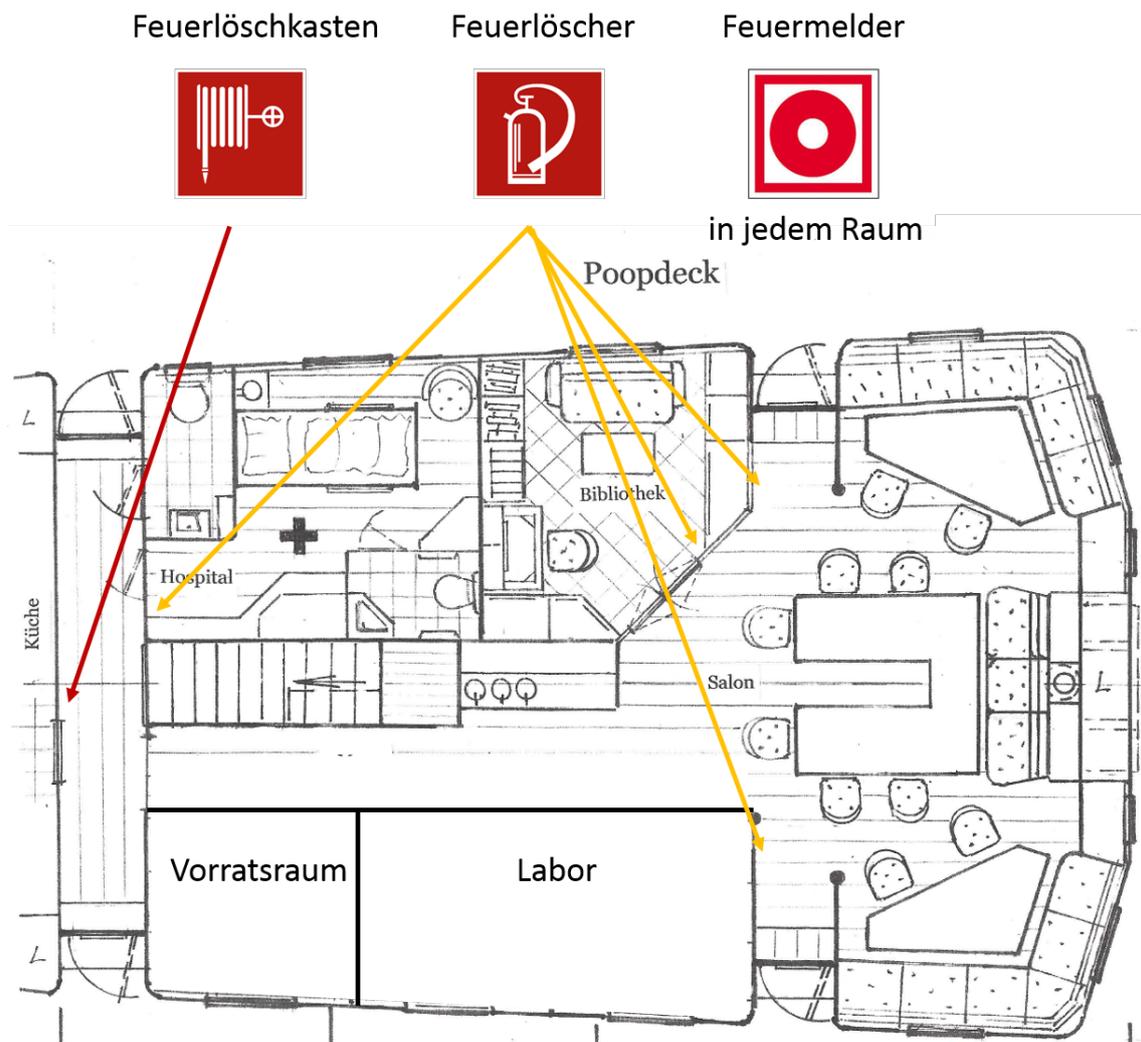


Abbildung 6.70.: Feuerlöscheinrichtungen auf dem Poopdeck

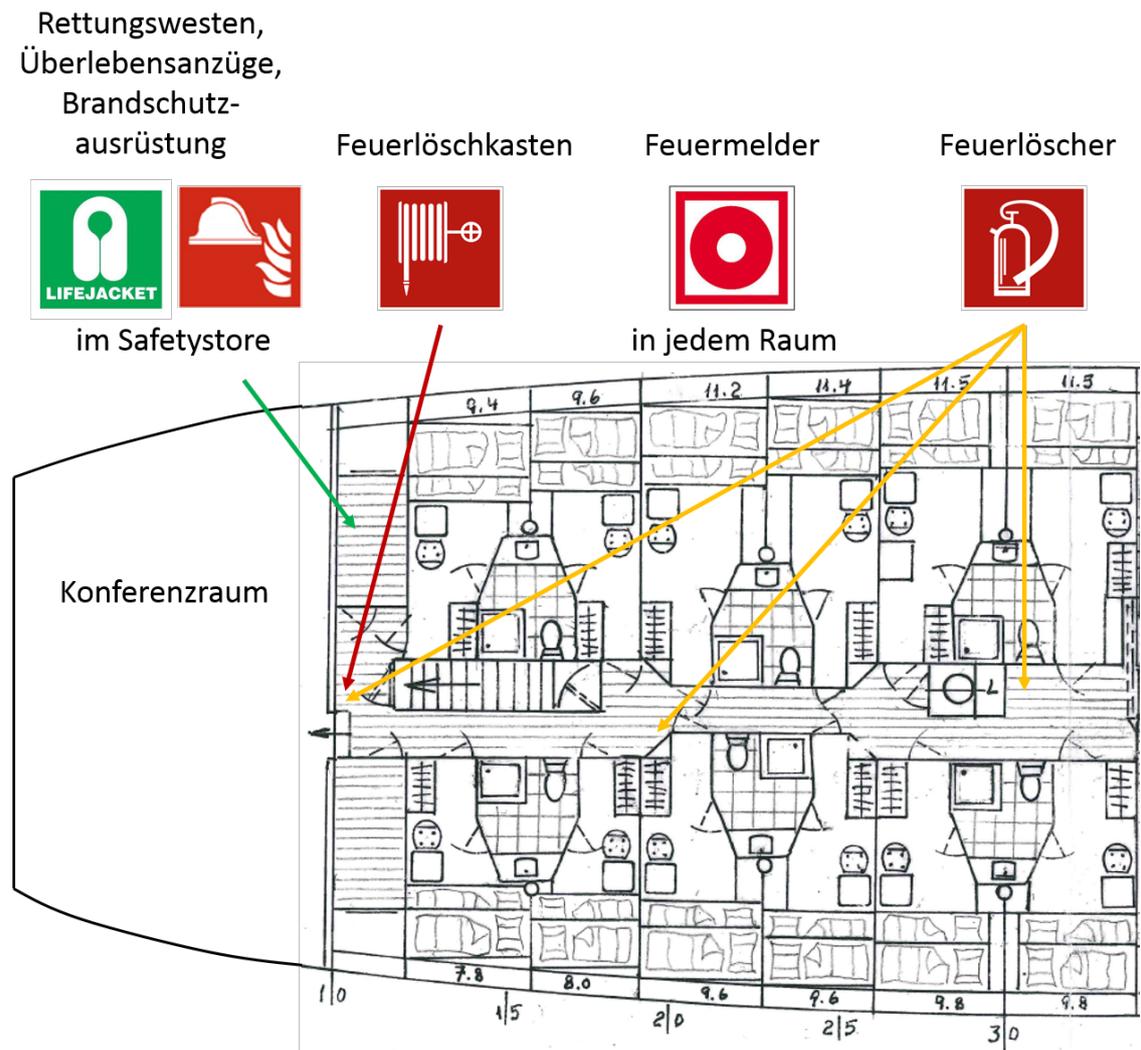


Abbildung 6.71.: Feuerlöscheinrichtungen auf dem Wohndeck

Auch im unteren Arbeitsgerätedeck werden an den Decken im Flur zwei Feuermelder angebracht sowie ein 6-kg ABC- Feuerlöscher im Flur. Es empfiehlt sich auch hier einen Feuerlöschkasten mit integriertem Schlauch zu installieren, damit das dort vorgesehene große Haupt-Labor ausreichend geschützt ist. Eventuell sollte der Batterieraum ebenfalls mit einer CO₂-Löschanlage versehen sein.

In der Kombüse wird ein System benötigt, welches für Frittiergeräte vorgeschrieben ist. Das System empfiehlt sich auch für eine Kombüse ohne Frittiergerät, da es immer wieder zu Fettbränden kommen kann. Zusätzlich zu diesem Brandschutz kann auch noch ein Feuerlöscher für Fettbrände bereitgestellt werden.

In Räumen, in denen sich elektrische oder elektronische Einrichtungen oder für die Sicherheit des Schiffes relevante Einrichtungen befinden, müssen Feuerlöscher vor-

gesehen sein, deren Löschmittel weder elektrisch leitfähig, noch für Geräte und Einrichtung schädlich sind.

Für die Laderäume des GreenSailers wird nach SOLAS Kap. II-2 Regel 10.7.1.3 für Schiffe mit einer Bruttoreaumzahl (BRZ) < 2000 kein zusätzliches Feuerlöschsystem benötigt. Falls es dennoch im Laderaum brennen sollte, sind die vorgeschriebenen Anschlussstutzen so installiert, dass der Laderaum mit Wasser gelöscht werden kann. Die Bruttoreaumzahl berechnet sich zu (Bundeskanzlei, 2018)

$$BRZ = K_1 \cdot V \quad (6.63)$$

$$K_1 = 0,2 + 0,02 \cdot \log_{10} V \quad (6.64)$$

V ist das Volumen aller geschlossenen Räume vom Kiel bis zum Schornstein, beim GreenSailer sind es ca. 4800 m^3 . Somit ist die $BRZ = 1313,4$. Soll jedoch Gefahrgut transportiert werden können, muss auch der Laderaum mit einer CO₂-Löschanlage ausgestattet sein (Heimhold, 2020).

Um die Besatzung im Einsatz während eines Brandfalls zu schützen, werden zwei Brandschutzausrüstungen benötigt. Zusätzlich müssen im Bereich der Unterkünfte zwei Fluchttreter bereit gestellt werden. Die beiden Brandschutzausrüstungen mit Pressluftatmern und den Druckflaschen können im Safetystore gelagert werden, dort können auch die Ersatzflaschen untergebracht werden.

Die Brandschutzausrüstung sowie die Atemschutzgeräte müssen dem FSS-Code genügen. Nach SOLAS Kap. II-2 Regel 10.10 werden für jedes Schiff zwei Brandschutzausrüstungen gefordert. Diese Brandschutzausrüstungen müssen mit persönlicher Ausrüstung und Atemschutzgerät ausgerüstet sein. Diese beinhalten wie auf Abbildung 6.72 zu sehen:

1. Schutzkleidung, die wasserbeständig ist, vor Strahlungswärme des Feuers sowie die Haut vor Verbrennung und Verbrühung durch Wasserdampf schützt
2. Stiefel, die aus Gummi oder einem anderen elektrisch nichtleitenden Stoff bestehen
3. einen Helm, welcher gegen feste Stöße schützt, eine elektrische Tragleuchte mit einer Mindestbrenndauer von 3 h
4. eine Axt, deren Griff hochspannungsisoliert ist.

Die Atemschutzgeräte müssen folgende Mindestanforderungen erfüllen: Das Atemschutzgerät muss ein Pressluftatmer sein, welcher das Volumen von 120 l in der



Abbildung 6.72.: Brandschutzausrüstung (Zhenjiang Matchau Marine Equipment, 2020)

Druckflasche beinhaltet, oder ein anderes Umluft unabhängiges Gerät mit einer Betriebsdauer von mindestens 30 Minuten. Alle Luftflaschen müssen austauschbar sein. Laut SOLAS Kap. II-2 Regel 10.10.2.5 müssen für jedes vorgeschriebene Atemschutzgerät zwei Reservefüllungen vorhanden sein. Frachtschiffe und Fahrgastschiffe, die nicht mehr als 36 Fahrgäste befördern und keine geeignete Einrichtung zum Befüllen der Flaschen haben, brauchen nur eine Reservefüllung. Des Weiteren gehört zur Ausrüstung eine Rettungsleine, welche zu jedem Atemschutzgerät an Bord vorhanden sein muss. Die Länge der Leine beträgt mindestens 30 m. Sie muss fest am Gürtel befestigt sein.

Auch Fluchttreter wie in Abbildung 6.73 werden in der Ausrüstung vorgeschrieben. Ein Fluchttreter ist ein mit Luft oder Sauerstoff versorgtes Gerät, das ausschließlich für die Rettung gefährdeter Personen verwendet wird. Es darf nicht zur Brandabwehr, Begehung von Tanks oder von Personen des Brandabwehrtrupps getragen werden. Zudem muss der Fluchttreter eine Einsatzdauer von mindestens zehn Minuten haben.

Alle Schiffe müssen in den Unterkunftsräumen mindestens zwei Fluchttreter mitführen. Zusätzlich müssen Ersatzfluchttreter an Bord sein. Der Nachrichtenaustausch zwischen den Brandbekämpfern muss gesichert werden. Um dies zu gewähren, müssen mindestens zwei tragbare Sprechfunkeinheiten für jeden Brandbekämpfungstrupp vorhanden sein. Ein Trupp besteht aus zwei Personen. Die Sprechfunkgeräte müssen explosionsgeschützt oder eigensicher sein. Die Brandschutzausrüstung ist an leicht zugänglichen Stellen und einsatzbereit aufzubewahren. Diese Stellen müssen dauerhaft und deutlich gekennzeichnet sein. Falls mehr als eine dieser Brandschutzausrüstungen an Bord mitgeführt wird, so müssen diese an unterschiedlichen, genügend weit von einander entfernten Stellen aufbewahrt werden.



Abbildung 6.73.: Fluchttreter (Zhenjiang Matchau Marine Equipment, 2020)

6.2. Beladungstechnik

Grundsätzlich ist der GreenSailer so entworfen, dass dieser mit hafenseitig vorhandener Infrastruktur be- und entladen werden kann. Dies ist für die Akzeptanz bei Reedereien und Hafenbetreibern wichtig. Beide Laderäume sind von den Schottpositionen her so gestaltet, dass zwei 20 Fuß-Container hintereinander platziert werden können. Darüber können in einer weiteren Lage unterstützt durch Affenfelsen weitere Container gestaut werden. Für die Handhabung von Containern braucht es landseitige Hebeeinrichtungen. Gleichzeitig soll das Schiff auch in kleinen Häfen selbständig agieren können. Hierzu ist es nötig, selbständig beinahe alle für den Transport vorgesehenen Güter mit Ausnahme von Containern umschlagen zu können. Im Bugbereich sind weitere Räume, deren Nutzung bisher unspezifiziert sind. Auch sie könnten für kleineres Stückgut genutzt werden.

Die folgenden Einrichtungen könnten für ein selbständiges Be- und Entladen verwendet werden:

- 2 t-Bordkran für kleinere Ladungseinheiten
- einziehbares Zwischendeck
- Hebebühne im Laderaum
- seitlicher Palettenlift
- seitliche Laderaumöffnung

Für einen unabhängigen Ladungsumschlag werden neben den Laderäumen eigene Bordkräne vorgesehen, die bis zu 2 t heben können. Wenn kleineres Stückgut gestaut wird, kann geprüft werden, ob die großen Laderäume durch ein Zwischendeck



Abbildung 6.74.: Seitliches Beladen (Schön, 2019)

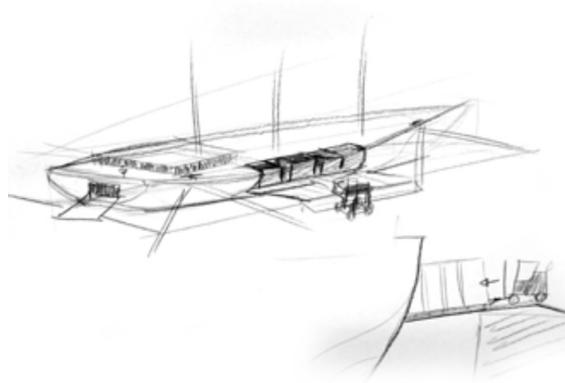


Abbildung 6.75.: Seitliches Beladen mit Gabelstapler (Schön, 2019)

zu unterteilen sind. In der Praxis kann Palettenwahrer bis zu vier Meter hoch gestapelt werden (Heimhold, 2020). Das Designbüro Olivier van Meer Design BV aus den Niederlanden hat eine innovative Hebebühne für einen Laderaum entwickelt, um die Ladung ohne Kran an Deck zu befördern. Von dort muss sie dann über die Gangway weiter an Land befördert werden. Auch möglich wäre ein seitlicher Palettenlift. Ein anderes Beladungskonzept stellt Schön (2019) in seiner Masterarbeit in den Abbildungen 6.74 und 6.75 vor, wo der GreenSailer über eine seitliche Öffnung im Rumpf tideabhängig horizontal beladen werden könnte.

AP 7: Ausbildungskonzept

Die International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) der IMO beschreibt einen Mindeststandard an Kompetenz, den seegehendes Personal international haben soll. Wird ein Schiff mit einem Segelsystem ausgestattet, so sollte die Crew entsprechend geschult werden, um für den Umgang mit dem Segelsystem ebenso wie für ihre anderen Aufgaben an Bord qualifiziert zu sein. Um eine ausreichende Schulung sicherzustellen, wurden von der IMO Model Courses entwickelt. In der Guidance on the implementation of IMO model courses (International Maritime Organization, 1999) werden Überlegungen zu Umfang, Zielsetzung, Eingangsvoraussetzungen und organisatorischem wie Lehrer- und Raumeignung oder Hilfsmittel beschrieben. Ein Model Course besteht aus einem Zeitplan, Lehrplan mit Lernzielen, Hilfestellungen für den Ausbilder und Angaben zur Beurteilung der Lernerfolge (International Maritime Organization, 2020).

Es sollte berücksichtigt werden, dass die Crew aus Besatzungsmitgliedern mit unterschiedlicher Intellektualität, Fähigkeiten, Zuständigkeiten und Verantwortungsbereichen besteht. Dementsprechend müssten Kapitäne und Offiziere in allen Belangen geschult werden, wohingegen die einfachere Besatzung lediglich in denen für sie relevanten Bereichen wie der Sicherheit, Handhabung und Wartung, aber nicht in der Steuerung der Systeme unterrichtet werden muss. Es kann auch so vorgegangen werden, dass nur die Kapitäne und Offiziere in einer Weise geschult werden, dass sie die relevanten Inhalte an die übrigen Besatzungsmitglieder weitervermitteln können (Ebeling, 2006). So wird sichergestellt, dass auch neu an Bord kommendes Personal vor Ort unterwiesen werden kann, und vorher kein extra Kurs an Land absolviert werden muss, was Aufwand und Kosten spart.

7.1. Model Course

Im Folgenden wurde ein Model Course für die Handhabung von Segelsystemen entwickelt, der in dieser allgemeinen Form sowohl für die Konfiguration mit Hochsegeln als auch mit Flettner-Rotoren verwendet werden kann (International Maritime Organization, 2020), (Boksch, 2018). In einer vorbereitenden Checkliste sollten die hier

genannten Betrachtungen spezifiziert werden. Zu der Liste kommen hinzu: eventuell notwendige Vorbereitungskurse, involviertes Lehrpersonal (Koordinator, Ausbilder, Instruktoren, Techniker, etc.), Lehrmaterial, Fachbücher, IMO-Referenzen, weiterführende Literaturangaben.

Umfang (Scope)

Der Umfang des Kurses muss regelmäßig auf die Bedürfnisse der Kursteilnehmer, den zu lehrenden Inhalt und auf zusätzliche nationale oder internationale Anforderungen überprüft werden.

Zielsetzung (Objective)

Nach der erfolgreichen Absolvierung des Kurses werden die Kursteilnehmer über das Wissen zur effizienten und sicheren Handhabung der Segelsysteme verfügen, sowohl manuell als auch im Automatikmodus. Durch die Vermittlung von technischem Hintergrundwissen und einem Vorort-Training an den Systemen werden die Teilnehmer in die Funktion und die Wartung eingeführt, um so einen sicheren und effizienten Betrieb gewährleisten zu können.

Eingangsvoraussetzungen (Entry standards)

Die Teilnehmer sollten die Unterrichtssprache verstehen können. Ansonsten sind keine weiteren Voraussetzungen zu erfüllen.

Zertifikat (Course certificate)

Ein Zertifikat sollte den Offizieren und Kapitänen ausgestellt werden, welches sie auszeichnet, das Schiff mit den Segelsystemen fahren und entsprechend neue Besatzungsmitglieder schulen und anleiten zu können.

Teilnehmerzahl (Course intake limitations)

Die Räumlichkeiten sollten groß genug sein, um alle Personen, die es betrifft, schulen zu können. Gegebenenfalls müssen parallele Gruppen gebildet werden.

Anforderungen an das Lehrpersonal (Staff requirements)

Die Ausbilder müssen sich gut im Sachverhalt auskennen, was das Segelsystem, aber

auch die schiffseitigen Auswirkungen wie Schiffsstabilität und Arbeiten an Deck angeht. Sie sollten selbst Offizier oder Kapitän sein, um die nautischen Aspekte vermitteln zu können. Idealerweise waren sie selbst im Entwicklungsprozess des Segelsystems beteiligt oder haben eigene Erfahrungen im Umgang mit dem System gesammelt. Die Ausbilder müssen sich an Hand des Lehrplans vorbereiten und geeignetes Anschauungsmaterial oder Handouts zusammenstellen. Um die Inhalte gut vermitteln zu können, sollten die Ausbilder in der Lehrtätigkeit geübt und ausgebildet sein.

Lehrräume und Material (Teaching facilities and equipment)

Der Raum muss groß genug für die Anzahl der Teilnehmer sein und mit der erforderlichen Technik wie Beamer und Tafel ausgestattet sein. Soweit möglich sollte das Training an Bord stattfinden, wenn das Segelsystem betriebsbereit installiert ist, um die Anwendung praktisch zu zeigen. Soll weiteres nautisches Personal bereits an Land geschult werden, wäre eine Bedienkonsole in einem Schiffsimulator ideal. Wenn das Schiff mit dem Segelsystem und dem entsprechenden physikalischen Verhalten im Simulator hinterlegt ist, lassen sich bereits an Land wichtige Erfahrungen im Umgang mit dem System sammeln.

7.2. Zeitplan

Der Zeitplan in Tabelle 7.15 zeigt eine Übersicht der zu behandelnden Themenfelder. Wenn Kurseinheiten an Bord stattfinden, muss damit gerechnet werden, dass sie längere Zeit in Anspruch nehmen, weil alles einerseits sehr ausführlich gezeigt werden kann und andererseits die Fahrmanöver durch andere Umweltbedingungen wesentlich länger dauern können als im Simulator. Beim ersten Mal sollte daher ein Tag Puffer eingeplant werden. Nach jeder Durchführung des Kurses sollten der Zeitplan und eventuell der Lehrplan angepasst werden. Nach Teil 3.3 der *Guidance on the implementation of IMO model courses* (International Maritime Organization, 1999) sollten der Kurs und die Ergebnisse durch jemanden evaluiert werden, der selbst vom Fach ist, um ein Untertrainieren oder ein Übertrainieren zu vermeiden.

Tabelle 7.15.: Zeitplan des Model Course (Vahs, 2018)

Tag	Uhrzeit	Themengebiet
1	08.00 - 09:30	Begrüßung, Organisatorisches 1. Handhabung des Segelsystems
	10:00 - 11:30	1. Handhabung des Segelsystems 2. Navigation
	11:45 - 13:15	2. Navigation 3. Manövrieren
	14:00 - 15:30	3. Manövrieren 4. Intaktstabilität
2	08.00 - 09:30	4. Intaktstabilität
	10:00 - 11:30	4. Intaktstabilität 5. Sicherheit
	11:45 - 13:15	5. Sicherheit
	14:00 - 15:30	6. Technologie
3	08.00 - 09:30	6. Technologie
	10:00 - 11:30	6. Technologie
	11:45 - 13:15	6. Technologie
	14:00 - 15:30	Zusammenfassung, Evaluation

Je nach verwendeten Lehrmaterialien (Tafel, Beamer, Handouts oder die reale Einheit auf dem Schiff) und Anschauungsmodellen wird der Ort für die Lehrtätigkeit gewählt. Dies kann ein mit der erforderlichen Technik ausgestatteter Raum an Land sein, auf dem Deck oder auf der Brücke oder einem sonst dafür geeigneten Raum an Bord oder im Simulator. Eine Lernzielkontrolle könnte im Verlauf oder am Ende des Lehrgangs durch mündliche oder schriftliche Tests erfolgen.

7.3. Lehrplan

Die im Zeitplan der Tabelle 7.15 enthaltenen Themen lassen sich in den folgenden Tabellen näher spezifizieren und bilden den Lehrplan. Die Themen können durch Fachbücher und wissenschaftliche Berichte in einem gesunden Maß ergänzt werden, darüber hinaus kann weiterführende Literatur zur Vertiefung angegeben werden (International Maritime Organization, 1999).

Die detaillierten Lernziele können in Ebeling (2006) und Boksch (2018) nachgelesen und auf das jeweilige Segelsystem angepasst werden. Lernziele helfen, die zu behandelnden Inhalte festzulegen.

7.3.1. Handhabung des Segelsystems

Tabelle 7.16 beschreibt die Kursinhalte zur Funktionsweise und Verwendung des Segelsystems.

Tabelle 7.16.: Handhabung des Segelsystems (Vahs, 2018)

Nr.	Thema	Inhalt	Zeit
1.1	Sinn der Brennstoffeinsparung	- ökonomischer Hintergrund - IMO/EU-Regularien	30'
1.2	Physikalische Funktionsweise	- Auftrieb und Widerstand - Magnus-Effekt - Beeinflussung der Propulsion - Einsparungen	30'
1.3	Bestandteile des Segelsystems	- Segel / Rotor - Ansteuerung: Motoren, Winden - Verankerung im Schiff - Steuerkonsole auf der Brücke	30'
1.4	Handhabung des Segelsystems	- Betriebsmodi - zeitl. Ablauf techn. gesehen - Zielgerichtetes Einsetzen	30'
			2 h

7.3.2. Navigation

Tabelle 7.17 geht auf die Besonderheiten in der Navigation und den Ausguck unter Verwendung des Segelsystems ein.

Tabelle 7.17.: Navigation (Vahs, 2018)

Nr.	Thema	Inhalt	Zeit
2.1	Kontrolle von der Brücke	- Abläufe in der Navigation - Sichtstrahl, Radar-Blindsektoren	60'

7.3.3. Manövrieren

Tabelle 7.18 behandelt die veränderte Manövrierfähigkeit des Schiffes, wenn das Segelsystem eingesetzt wird, und worauf geachtet werden muss.

Tabelle 7.18.: Manövrieren des Schiffes (Vahs, 2018)

Nr.	Thema	Inhalt	Zeit
3.1	Effekte durch Kräfte und Momente durch das Segelsystem	- Kräfte, Momente, Hebelarme - Segeldruckpunkt und hydrodynamischer Druckpunkt - Größenordnung der Kräfte und Momente	45'
3.2	Beeinflussung der Manövrierfähigkeit	- Kurshaltevermögen - Drehkreisfahrt - Aufstoppen	60'
3.3	Kriterien und Beschränkungen beim Manövrieren	- IMO-Resolution MSC.137(76)	15'
			2 h

7.3.4. Intaktstabilität

Tabelle 7.19 geht auf die Anwendung und Berücksichtigung der Intaktstabilität ein. Je nach Beladungsfall verhält sich das Schiff anders und muss gegebenenfalls ballastiert werden, um die Momente durch das Segelsystem ausgleichen zu können. Bei zu starkem Wind müssen die Seitenkräfte durch Reffen der Segel oder Reduzierung der Rotordrehzahl reduziert werden, um ein Kentern zu verhindern.

Tabelle 7.19.: Besonderheiten der Intaktstabilität unter Verwendung eines Segelsystems (Vahs, 2018)

Nr.	Thema	Inhalt	Zeit
4.1	Kräfte und Momente bezogen auf die Stabilität	- Kräfte, Momente, Hebelarme - Größenordnung der Kräfte	30'
4.2	Krängung durch Seitenkräfte	- statische Krängung - dynamische Krängung - Krängungswinkel	30'
4.3	Stabilitätskriterien	- Stabilitätskriterien bei Verwendung des Segelsystems - Stabilitätsgrenzen	30'
1.4	Stabilität überprüfen	- Stabilitätshandbuch mit versch. Segelzuständen (gerefft) - Ladefälle - Grenzkurven	90'
			3 h

7.3.5. Sicherheit

Tabelle 7.20 beschreibt die einzelnen Sicherheitsaspekte, die beim Betrieb des Segelsystems zu beachten und durchzuführen sind.

Tabelle 7.20.: Sicherheit (Vahs, 2018)

Nr.	Thema	Inhalt	Zeit
5.1	Risiken im Betrieb des Segelsystems	- Risikoabschätzung	40'
5.2	Vorgehensweise, um Risiken zu vermeiden	- Schutzmaßnahmen - Schutz der Crew u. Passagiere	40'
5.3	Notfallmaßnahmen	- Notstopp - Stromversorgung unterbrechen - Wind aus dem System nehmen	40'
			2 h

7.3.6. Technologie

Tabelle 7.21 gibt einen Überblick über die Systemkomponenten, Wartung und Service.

Tabelle 7.21.: Technologie des Segelsystems (Vahs, 2018)

Nr.	Thema	Inhalt	Zeit
6.1	Brückenkontrollsystem	- Systemüberblick - Kontrollelemente - Display-Verwaltung - manueller Betrieb - automatischer Betrieb - Display-Informationen - Notstopp	120'
6.2	Technische Komponenten	- Segelrigg / Rotor - Hydraulik, Winden / Antriebsmotor - Lager - Schmierung - Heizung / Kühlung - Lüftung - Schaltschrank - Messungen und Datenerfassung	60'
6.3	Betriebsabläufe	- Kontrolle vor Inbetriebnahme - Systemstart - Systemstopp - Notfallmaßnahmen - reguläre Überprüfung - Fehleranalyse	60'
6.4	Reguläre Wartung	- Instandhaltungsplan	30'
6.5	Service kontaktieren	- Service-Abläufe	30'
			5 h

7.4. Blended Learning-Modul

Das Modell des GreenSailers ist in eine Virtual Reality-Umgebung eingefügt worden, sodass der Model Course auch als Blended Learning-Modul angeboten werden kann. Dabei handelt es sich um eine Mischform des Lernens. In diesem Kontext umfasst sie sowohl das virtuelle als auch das reale Lernen bzw. das Anwenden des theoretisch Gelernten. So kann ein Training virtuell stattfinden, lässt sich jedoch auf reale Situationen übertragen. Hierfür können die Brücke, das Deck und der Maschinenraum genutzt werden.

AP 8: Wirtschaftskonzept

Um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit des GreenSailers treffen zu können, wurden eine Kostenvergleichsrechnung, ein Gewinnvergleich, die Berechnung der Zeitcharter und eine dynamische Investitionsrechnung durchgeführt. Dieses Kapitel ist in Auszügen der Bachelorarbeit von Lorberg (2021) entnommen, dessen Arbeit beratend durch die AG Reederei Norden-Frisia und die EMS-Fehn-Group begleitet worden ist. Detailliertere Angaben finden sich in seiner Arbeit und den dazugehörigen Exceltabellen.

Nach Aussage der AG Reederei Norden-Frisia lässt sich das Schiff in seiner derzeitigen Konstruktion nicht für die Versorgung der ostfriesischen Inseln einsetzen. Die Technische Leitung der AG Reederei Norden-Frisia und die Fahrdienstleitung zeigten anhand von Seekarten und Wetterdaten, dass der Tiefgang des Schiffes bei den meisten Inseln der Nordsee eine Anfahrt unmöglich macht. Helgoland und Sylt könnten zwar zu bestimmten Bedingungen angefahren werden, jedoch werden dort ausschließlich "Roll on, Roll off" Frachten umgeschlagen.

Ein weiterer Faktor, welcher der Rentabilität des Schiffes entgegenwirkt, ist die Auslegung auf zu viele verschiedene Bereiche. Laut EMS-Fehn-Group ließe sich der Betrieb des Schiffes nur rentabel gestalten, wenn eine Sparte festgelegt wird. Dementsprechend entweder auf Frachttransport oder Forschungsschiffahrt. Bei der AG Reederei Norden-Frisia wurde zudem empfohlen eine seitliche Ladeluke zu installieren, um so das Laden und Entladen von rollender Fracht zu ermöglichen.

Die Ausbildung von Trainees wird nicht als Problem gesehen, weil sich dadurch Fördermöglichkeiten nutzen lassen, welche der Wirtschaftlichkeit des Schiffes zugutekommen. Die Vergabe von Kabinen an Passagiere sorgt dafür, dass die Kosten für Personal, Verpflegung und Versicherung steigen. Daher wird von der EMS-Fehn-Group davon abgeraten Passagiere, die nicht als Forschungspersonal oder zur Ausbildung an Bord sind, aufzunehmen. Hinzu kommt die Beflaggung des Schiffes. Als Frachtschiff ergibt es Sinn, das Schiff deutsch zu beflaggen, wenn das Schiff im Zweitregister der deutschen Flagge geführt wird und so keine Heuer nach Heuertarif und Manteltarifvertrag (MTV) gezahlt werden muss, da die Vorgaben des Erstregisters,

beziehungsweise die Kosten der Heuer, eine Konkurrenzfähigkeit deutlich erschweren.

Für den Betrieb eines Forschungsschiffes ist es üblich das Schiff im Erstregister zu führen und eine komplett deutsche Besatzung anzustellen. Schwierig wird es jedoch sein in den geschlossenen Markt für Forschungsschiffe einzutreten, da Forschungsschiffe bei staatlichem Einsatz per Ausschreibung ausgewählt werden.

Grundsätzlich sollte auf Zeitcharter gesetzt werden, dadurch lassen sich die variablen Kosten des Schiffes für den Vercharterer auf den Charterer übertragen. Konkret laufen die Empfehlungen auf zwei Konzepte hinaus:

Konzept 1: Der GreenSailer wird hauptsächlich auf den Transport von Fracht ausgelegt. Auf ein Labor wird gänzlich verzichtet. Zudem wird das Schiff ins deutsche Zweitregister eingetragen. Heuerverträge werden nicht nach deutschem Heuertarif und MTV geschlossen. Zudem wird eine Crewing-Agentur zu Rate gezogen. Dadurch muss bestehendes Personal nur nach der Zeit, die sie an Bord verbringt, bezahlt werden, was die Kosten für Besatzung im Vergleich zum Heuertarif und MTV deutlich reduziert.

Konzept 2: Der GreenSailer wird hauptsächlich auf die Nutzung als Forschungsschiff ausgelegt. Der anfänglich eingeplante Laderaum wird gänzlich zu Laborfläche umgewandelt. Dies geschieht unter anderem deshalb, weil aus Sicherheitsgründen die Nutzung von Laderäumen als Wohn- oder Arbeitsumgebung nicht zulässig ist. Zusätzliches Personal für die Verpflegung des Forschungspersonals sollte nur nach Bedarf angestellt werden. Diese Kosten werden an den Charterer übertragen. In beiden Konzepten wird zusätzlich eine Förderung für Nachwuchskräfte beantragt, dadurch lassen sich bis zu drei Viertel der Kosten für Trainees durch staatliche Förderung übernehmen.

8.1. Kosten

Die Anschaffungskosten setzen sich aus dem Neubau des Schiffes und der zu nutzenden Ausrüstung zusammen. Die 65 m lange *Alexander von Humboldt* hat vor sieben Jahren 12,5 Mio. Euro gekostet (Löll, 2020). Dieser Wert wurde hier als Orientierung ebenfalls für die Anschaffungskosten angesetzt. Die Fixkosten beinhalten die Kosten zum Erhalt des vertragsmäßigen Zustands des Schiffes. Dazu zählen Besatzung, Ausrüstung, Unterhalt und Versicherung des Schiffes. Um die Bedingungen

für einen sicheren Betrieb zu erfüllen, ist der Reeder für die folgende personelle Besetzung verpflichtet:

1. Kapitän
2. Erster nautischer Offizier
3. Zweiter nautischer Offizier
4. Leiter der Maschinenanlage
5. Bootsmann
6. Matrose mit Matrosenbrief und Zeugnis für Küchendienst
7. Schiffskoch bei Konzept 2

Durch die direkte Anstellung des Bordpersonals und den daraus entstehenden finanziellen Verpflichtungen entstehen Kosten, die mehr als dem doppelten entsprechen, was für vergleichbares Personal über das Zweitregister in Kombination mit einer Crewing-Agentur anfallen würde. Dies ergibt sich daraus, dass durch den Manteltarifvertrag Urlaubsansprüche entstehen, welche auch in Anspruch genommen werden müssen, da diese nicht mit der Heuer wie sonst üblich abgegolten werden. In Zahlen bedeutet dies, dass für 30 Arbeitstage 15 Urlaubstage entstehen. Somit bedeutet dies zum einen, dass das selbst angestellte Bordpersonal nach seiner Zeit an Bord bezahlten Urlaub nimmt und gleichzeitig für den sicheren Betrieb des Schiffes neues Personal an Bord zu bringen ist, was die Gesamtzahl der angestellten in diesem Szenario verdoppelt.

Alternativ kann auf das zweite Register zurückgegriffen werden. Dort kann das Bordpersonal nach alternativen Verträgen angestellt werden. Für das Personalmanagement sollte auf eine Crewing-Agentur zurückgegriffen werden, welche das passende Personal zusammenstellt. Dies ermöglicht, dass das Personal nur nach seiner Beschäftigungszeit an Bord bezahlt werden muss. Des Weiteren braucht es eine Person als Geschäftsführung und Vertrieb und eine weitere für Einkauf und Wartung als landbasierte Reederei.

Hinzu kommen Versicherungskosten. Die Höhe der Versicherungssummen des GreenSailers werden deutlich höher als bei einem klassischen Frachtschiff angesetzt, weil man davon ausgehen kann, dass der GreenSailer von den Versicherern zum einen wegen des breit gefächerten Einsatzspektrums und zum anderen durch den Einsatz neuer Technologien, da es sich aus Sicht der Versicherer um experimentelle Technologien handelt, höher eingestuft wird. Auf Anraten der EMS-Fehn Group wurde

eine Summe von 150.000 € festgelegt. Dies kommt durch das breite Verwendungsspektrum zustande. Zudem fallen höhere Versicherungsbeiträge an, wenn Personen ohne Sicherheitslehrgang wie dem Basic Safety transportiert werden, was auf die Mitnahme von touristischen Passagieren zutrifft. Bei der Festlegung der Versicherungssumme für das durch die Berater optimierte Schiff wurde auf Anraten der EMS-Fehn Group eine Summe von ca. 100.000 € für beide Szenarien festgelegt. Dies wird damit begründet, dass der GreenSailer auf bestimmte Bereiche spezialisiert wird und auf die Mitnahme von touristischen Passagieren verzichtet wird.

Die Unterhaltskosten, welche vom Vercharterer zu tragen sind, werden in die drei Bereiche Verpflegung, Wartung und Ausrüstung aufgeteilt. Die Verpflegungskosten pro Besatzungsmitglied werden auf ca. 8 € pro Tag geschätzt. Der Richtwert dabei ist unter anderem der amtliche Sachbezugswert für Essenzuschuss von 5,20 € pro Mitarbeiter pro Tag. Dies deckt aber nicht die Versorgung mit Getränken ab. Dazu muss noch ein Betrag von schätzungsweise 2,80 € pro Tag hinzugerechnet werden.

Wartungskosten stellen in erster Linie die Aufrechterhaltung des Schiffsbetriebes aus eigenen Bordmitteln dar. Dazu zählen Wartungsarbeiten, kleinere Reparaturmaßnahmen, Entrostung und Malerarbeiten sowie Verbräuche für Reinigungsmittel und Entsorgung. Der Einkauf von entsprechenden Verbrauchsmitteln wird pauschal auf 10 % des jährlichen Budgets für den Unterhalt der Ausrüstung geschätzt. Das jährliche Budget errechnet sich aus den Anschaffungskosten der Ausrüstung dividiert durch die Nutzungsdauer des Schiffes, um so den einmaligen Ausfall jedes Systems über die gesamte Nutzungsdauer einzukalkulieren.

Bei einer Zeitcharter hat der Charterer die variablen Kosten des Schiffsbetriebs zu tragen, insbesondere Hafengebühren, Lotsengelder, Schlepperhilfen und Prämien für eine weitergehende Versicherung des Schiffes. Der Zeitcharterer hat ferner den für den Betrieb des Schiffes erforderlichen Treibstoff in handelsüblicher Qualität zu beschaffen. Diese Variablen Kosten müssen daher nicht in der Berechnung berücksichtigt werden.

8.2. Finanzierung

Für die Finanzierung des Schiffes bieten sich zwei klassische Modelle der Finanzierung an. Zum einen das Schiffshypothekendarlehen, welches die klassische Fremdfinanzierung darstellt. Zum anderen die Eigenkapitalfinanzierung über einen geschlossenen Schiffsfond.

Die Beleihungsgrenze ist die Höhe, bis zu der eine Bank bereit ist, das Schiffshypothekendarlehen auf das Schiff abzustellen. Die übliche Höhe beträgt 70 % bezogen auf den aktuellen Marktwert oder die geschätzten Baukosten des Schiffes. Je spezieller das Schiff wird, desto niedriger wird die Beleihungsgrenze ausfallen. Dabei hängt die Bewertung von der Ausrichtung und Spezialisierung der jeweiligen Bank ab, und wie Erfolge auf Hinblick der Erlöse durch die Bank dem Projekt zugesprochen werden. Zuträglich wird bei der Bewertung sicherlich auch die Beteiligung von Förderern wie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) sein.

Im Fall eines geschlossenen Schiffsfonds ist die Idee, dass sich verschiedene Geldgeber zusammenschließen und sowohl die Baukosten als auch die Chancen und Risiken des Betriebs des Schiffes miteinander teilen. Konkret auf den GreenSailer bezogen, bietet sich das Modell für eine Einschiffgesellschaft an. Die Einschiffgesellschaft stellt die klassische GmbH & Co. KG dar. Dabei beteiligen sich die Anleger meist unmittelbar oder mittelbar als Kommanditisten oder Treuhandkommanditisten. Beteiligte an dem geschlossenen Schiffsfond sind Reeder, Werft, Charterer, Kreditinstitute, Emissionshaus und Vertriebspartner sowie Wirtschaftsprüfer / Steuerberater / Rechtsanwälte.

Um das Eigenkapital des Reeders zu erhöhen, gibt es verschiedene Beteiligungsmöglichkeiten wie Crowd-Funding, Business Angels, Wagniskapital oder Sponsoring.

8.3. Berechnungen

Nach der statischen und dynamischen Investitionsrechnung wurden zunächst die Charterraten berechnet, welche zur Deckung der Kosten in den jeweiligen Berechnungsarten ausreichend sind. Diese stellen die niedrigsten Charterraten dar, bei der das Investitionsobjekt keine Verluste verzeichnet. Im Anschluss wurde eine einheitliche Charterrate angesetzt, um eine Vergleichbarkeit der Investitionen herzustellen. Dazu wurde die vorher berechnete Charterrate der Investitionen in den jeweiligen Szenarien auf den jeweils gemeinsamen nächsten Tausender aufgerundet.

Die Berechnungen erfolgten einmal nach den vorgegebenen Parametern aus dem Projekt und einmal optimiert durch eine Beratung der Reedereien. Bei den vorgegebenen Parametern soll das Schiff 25 Jahre lang betrieben werden. Das Schiff wird unter deutscher Flagge mit deutscher Besatzung gefahren und im ersten Register geführt, wodurch die Heuer nach Heuertarif berechnet wird und die Vorgaben nach Mantel-Tarif-Vertrag gelten. Das Schiff soll in der Lage sein, sowohl Fracht zu transportieren als auch einen Forschungs- und Ausbildungsbetrieb zu ermöglichen.

Die Mitnahme von Passagieren soll zudem möglich sein. Die Betriebstage wurden mit 360 Tagen angenommen mit 5 Tagen im Dock. Die Finanzierung erfolgt zu 100 % aus Fremdmitteln. Förderungen oder Steueroptimierungen wurden nicht in Anspruch genommen.

Im Fall der Optimierungen wurde unter anderem die Spezialisierung auf ein Gebiet vorgenommen. Das bedeutet, dass der GreenSailer entweder als Frachtschiff oder als Forschungsschiff betrieben wird. Ein Verzicht auf Passagiere führt in diesem Zusammenhang dazu, dass die Einschränkung der Einsatzfelder die Versicherungssumme senkt.

Die Eintragung ins deutsche Zweitregister eröffnet die Möglichkeit, Personal nach GIS Vertrag anzustellen, beziehungsweise wird auf eine Crewing-Agentur zurückgegriffen. Dies führt dazu, dass Personal nur für die tatsächliche Zeit an Bord bezahlt werden muss, da es nicht direkt über die Reederei angestellt wird.

Zudem werden Fördergelder über das BMWi für den Neubau beantragt, welches bis zu 45 % der Kosten für den Neubau trägt. Dies wird u.a. über das Forschungszentrum Jülich möglich durch die „Maritime Forschungsstrategie 2025“ durch die Richtlinie „Innovativer Schiffbau sichert wettbewerbsfähige Arbeitsplätze“ des BMWi. Zusätzlich erhält man Rückflüsse aus der Lohnsteuer von ca. 21 % der gezahlten Bruttolöhne. Weitere Steueroptimierungen sind möglich, müssten aber im Detail mit einem Finanzexperten besprochen werden. Der Eigenanteil des Neubaus wird mit 30 % von der Summe beziffert, die nach Abzug der Fördersumme übrigbleibt, und kann durch die oben beschriebenen Möglichkeiten eingeholt werden. Es wird aufgrund der günstigen Zinslage ein Zins von 3 % angenommen. Zudem werden 350 Nutzungstage als realistisch angesehen.

Sowohl in der Berechnung mit den vorgegebenen Parametern als auch bei der Optimierung wurden zwei Szenarien einmal mit dem Schwerpunkt Fracht und einmal mit dem Schwerpunkt Labor erstellt.

8.3.1. Schwerpunkt Fracht

Hier betrachtet man den GreenSailer als Frachtschiff, wobei bauliche Anpassungen darin liegen, dass der Laderaum auf Kosten der Laborräume größer ausfällt. Zusätzlich wird eine seitliche Luke am Schiff angebracht, um den Umschlag von RoRo-Ladung zu ermöglichen.

Im Folgenden sind die Beträge sowohl für Berechnung nach den vorgegebenen Parametern als auch für die optimierte Berechnung durch einen Schrägstrich getrennt angegeben.

Für die Zeitcharterrate wurde eine Rate von 5.258 € / 2.315 € pro Tag durch das statische Verfahren ermittelt und durch das dynamische Verfahren eine Rate von 5.467 € / 2.438 € pro Tag, welche mindestens erhoben werden muss. Bei der Verwendung im statischen Investitionsverfahren ergeben sich folgende Ergebnisse: Die ermittelten jährlichen Betriebskosten belaufen sich laut Kostenvergleichsrechnung auf 1.892.725 € / 810.127 €. Es liegt kein Gewinn vor, da die Mindestcharterrate angesetzt wurde. Der Kapitalwert, berechnet aus der dynamischen Investitionsrechnung und der Mindestcharterrate von 5.467 € / 2.438 € pro Tag, beträgt hier 18.412 € / 29.779 €. Diese Summe entspricht dem abgezinsten Restwert des Schiffes nach 25 Jahren. Das Investment wird nach 25,1 Jahren amortisiert.

8.3.2. Schwerpunkt Labor

Hier betrachtet man den GreenSailer als Forschungsschiff, wobei bauliche Anpassungen darin liegen, dass der Laderaum zusätzlich als Laborfläche genutzt werden kann.

Für die Zeitcharterrate wurde eine Rate von 5.570 € / 2.399 € pro Tag durch das statische Verfahren ermittelt und durch das dynamische Verfahren eine Rate von 5.780 € / 2.527 € pro Tag, welche mindestens erhoben werden muss. Bei der Verwendung im statischen Investitionsverfahren ergeben sich folgende Ergebnisse: Die ermittelten jährlichen Betriebskosten belaufen sich laut Kostenvergleichsrechnung auf 2.005.373 € / 839.583 €. Es liegt kein Gewinn vor, da die Mindestcharterrate angesetzt wurde. Der Kapitalwert, berechnet aus der dynamischen Investitionsrechnung und der Mindestcharterrate von 5.780 € / 2.527 € pro Tag, beträgt hier 18.412 € / 29.779 €. Diese Summe entspricht dem abgezinsten Restwert des Schiffes nach 25 Jahren. Das Investment wird nach 25,1 Jahren amortisiert.

8.3.3. Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Mit einer aufgerundeten Charterrate von 6.000 € pro Tag für einen Betrieb mit den vorgegebenen Parametern bzw. 3.000 € pro Tag für einen optimierten Betrieb lassen sich die in Tabelle 8.22 berechneten Werte erzielen. Es ist zu sehen, dass der Betrieb als Frachtschiff nach optimierter Finanzierung den höchsten Kapitalwert am Ende der Laufzeit einbringt. Die Amortisation wird nach der statischen Investitionsrechnung nach 13 Jahren erreicht. Es sollte noch erwähnt werden, dass eine

Tabelle 8.22.: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

	vorgegeben		optimiert	
Mindestcharterraten:	Fracht	Labor	Fracht	Labor
statisch	5.258 €	5.570 €	2.315 €	2.399 €
dynamisch	5.467 €	5.780 €	2.438 €	2.527 €
angesetzte Charterrate	6.000 €	6.000 €	3.000 €	3.000 €
Statische Investitionsrechnung				
Kostenvergleich	1.892.725 €	2.005.373 €	810.127 €	839.583 €
Gewinnvergleich	267.275 €	154.627 €	239.873 €	210.417 €
Rentabilität	9,26 %	7,46 %	9,34 %	8,20 %
Amortisation [a]	16,34	19,17	13,13	14,20
Dynamische Investitionsrechnung				
Kapitalwert	2.753.514 €	1.135.859 €	3.456.202 €	2.912.228 €

Abschreibung in der statischen Investitionsrechnung mit einbezogen worden ist, was bedeutet, dass am Ende der Laufzeit zusätzlich ein Kapital in Höhe des Kaufpreises vorliegt, mit dem ein neues Schiff gekauft werden kann, um das Geschäft fortführen zu können.

Die aktuellen Charterraten für Frachtschiffe liegen derzeit bei um die 2500 € für Schiffe der doppelten Größe, was den GreenSailer in seiner aktuellen Form nicht konkurrenzfähig macht. Jedoch sollte angemerkt werden, dass der Markt für nachhaltige Schifffahrt ein wachsender Markt ist, was die bestehenden Konzepte für nachhaltige Transportfahrten beweisen. Das nicht unerhebliche Einsparpotential des Kraftstoffes stellt den offensichtlichsten Vorteil des GreenSailers dar, beziehungsweise ist dies eine gute Grundlage, um die Aufmerksamkeit jener Charterer auf sich zu ziehen, welche gezielt auf Nachhaltigkeit schauen. Eventuell kann der eingesparte Kraftstoff auf einer festen Route gegengerechnet werden, um einen effektiven Charterpreis angeben zu können. Wenn in Zukunft der Emissionshandel in der Seefahrt eingeführt wird, macht dies zwar den GreenSailer nicht günstiger, jedoch die restliche Seefahrt teurer, was dazu führt, dass die Kostendifferenz weiter abnimmt.

Nicht zu unterschätzen ist der idealistische Wert des Projektes. Durch geschickte Vermarktung kann über die genannten Beteiligungsmöglichkeiten das Eigenkapital erhöht werden, sowohl durch Investoren als auch durch Spender, die hinter der Idee des Projektes stehen. Je mehr positive Aufmerksamkeit das Projekt generiert, desto eher lassen sich Investoren, Sponsoren und die breite Masse dazu bewegen zu investieren. Obwohl das Projekt selbst nicht wirtschaftlich auf eigenen Beinen stehen kann, so werden die Forschungsergebnisse als wertvoll betrachtet. Die befragten Unternehmen versprechen sich daraus übertragbare Lernerfolge für bestehende Schiffe.

Literaturverzeichnis

- [ACADEMIC 2020] ACADEMIC: *Magnus Effekt*. <https://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/902070>. Version: 2020
- [Amanieu 2020] AMANIEU, Hugues-Yanis: *E-Ferry Project: Prototype and full-scale demonstration of next-generation 100 percent electrically powered ferry for passengers and vehicles*. <http://e-ferryproject.eu/Output-Material#>. Version: 2020
- [Beermann 2020] BEERMANN, Marisa: *Master Thesis: Parameter study on the feasibility of battery-driven Waddensea ferries*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Masterarbeit, 2020
- [Bernitsas u. a. 1981] BERNITSAS, M. ; RAY, D. ; KINLEY, P. ; DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING (Hrsg.): *KT, KQ and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers*. 1981
- [Besserer 2016] BESSERER, Nadine: *Entwurf von Brückenlayout und Ausstattung für einen innovativen Frachtsegler im Green Sailer Projekt*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Bachelorarbeit, 2016
- [BG Verkehr 2014] BG VERKEHR: *Anforderungen. Bauliche Maßnahmen auf Seeschiffen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Öl, Abwasser, Müll und Abgasemissionen*. 2014
- [Boksch 2018] BOKSCH, Jakob: *Entwicklung eines Trainingsmoduls für den Betrieb von Flettner Rotoren auf Schiffen im Rahmen des Projektes Eco-Flettner*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Bachelorarbeit, 2018
- [Bomanson u. Ramne 2018] BOMANSON, Joakim ; RAMNE, Bengt: *SUMMETH - Sustainable Marine Methanol: Deliverable D4.1: General arrangement, class documentation*. 2018
- [Brix 1987] BRIX, J.: *Manoeuvring Technical Manual*. In: *Schiff & Hafen/Kommandobrücke* (1987), Nr. 5, S. 54–58

- [Brück 2016] BRÜCK, Matthias: *Hydromechanische Kavitation - keimfrei ohne Biozide: Hydromechanische Kavitation zur Wasseraufbereitung nutzt chemische und physikalische Kräfte der Kavitation zur Beseitigung von Verkeimungen im Kühlwasser.* <https://drbrueck.de/hydromechanische-kavitation-keimfrei-ohne-biozide/>. Version: 2016
- [Bundeskanzlei 2018] BUNDESKANZLEI, Schweizerische: *Internationales Schiffsvermessungs-Übereinkommen von 1969: 0.747.305.412.* 2018
- [Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz 2019] BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ UND VERBRAUCHERSCHUTZ: *Verordnung über die Unterkünfte und Freizeiteinrichtungen der Besatzungsmitglieder an Bord von Kauffahrteischiffen (See-Unterkunftsverordnung - SeeUnterkunftsV): See-Unterkunftsverordnung vom 17. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1453).* http://www.gesetze-im-internet.de/seeunterkunfts_v_2019/BJNR145300019.html. Version: 2019
- [Caterpillar Marine] CATERPILLAR MARINE: *Methanol als Kraftstoff für Großmotoren: MethaShip Abschlussveranstaltung.* <https://www.vsm.de/de/presseinformation/7818>
- [Celtic Cruises 2020] CELTIC CRUISES: *Investment Opportunity: Cross Channel Freight and Passenger Service - Emissions Free, Green Transport.* https://lo-entropy.weebly.com/uploads/9/8/5/2/98527360/celtic_cruise_investment_opportunity.pdf. Version: 2020
- [DNV GL 2016] DNV GL: *Design and construction of large modern yacht rigs.* 2016
- [Ebeling 2006] EBELING, Joachim: *Ausbildung für SkySails-Anwender – Entwicklung eines Konzepts.* Leer, Fachhochschule Ostfriesland, Diplomarbeit, 2006
- [EcoClipper 2020] ECOCLIPPER: *Sailing Routes.* <https://ecoclipper.org/routes/>. Version: 2020
- [Econowind 2020] ECONOWIND: *Key wind-assist propulsion installation starts North Sea operations.* <https://www.econowind.nl/index.php/2020/03/02/key-wind-assist-propulsion-installation-starts-north-sea-operations/>. Version: 2020
- [Elger u. a. 2020] ELGER, David E. ; BENTIN, Marcus ; VAHS, Michael: Comparison of different methods for predicting the drift angle and rudder resistance by wind propulsion systems on ships. In: *Ocean Engineering* 217 (2020). <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108152>. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108152. – ISSN 00298018

- [EMCEL GmbH 2019] EMCEL GMBH: *Warum fasst ein Wasserstofftank bei 700 bar nicht doppelt so viel wie bei 350 bar?* <https://emcel.com/de/warum-fasst-ein-wasserstofftank-bei-700-bar-nicht-doppelt-so-viel-wie-bei-350-bar/> Version: 2019
- [Friedhoff u. Tenzer 2018] FRIEDHOFF, B. ; TENZER, M.: *Windship Modelling and Voyage optimization: DST contribution to the MariGreen project: Report 2220*. 2018. – Report 2220
- [Germann 2006] GERMANN, André ; DVV MEDIA GROUP GMBH (Hrsg.): *Fehn Pollux segelt los*. <https://www.thb.info/rubriken/single-view/news/fehn-pollux-segelt-los.html>. Version: 29.06.2018
- [Greenheart 2015] GREENHEART: *Greenheart Project | Design*. <http://greenheartproject.org/en/ship/design/#toggle-id-3>. Version: 2015
- [Greensafer 2020] GREENSAFER: *Schutz vor Legionellen im Kühlwasser*. https://www.greensafer.eu/industrie-2/42-bimschv-legionellen/?gclid=CjwKCAiAqqTuBRBAEiwA7B66hR-wA1rlSE4N7aIAC9mvVv_-4qnkAfP10bp3jaYy82i-Ch8vf0bsSTh0CbJYQAvD_BwE. Version: 2020
- [H2-Industries 2019] H2-INDUSTRIES: *LOHC-Wertschöpfungskette*. <https://h2-industries.com/technologie/>. Version: 2019
- [Hakkinen 2008] HAKKINEN, Pentti: *Ship Auxiliaries. 11.1: Wärtsilä New Professionals 3.-7.11.2008*. http://www.marine-knowledge.com/auxilliary_systems/ship-auxiliary-systems-main-switchboard/. Version: 2008
- [Heimhold 2020] HEIMHOLD, Daniel ; ELGER, David (Hrsg.): *Projekt Greensailer - technische Anmerkungen - Meeting D. Elger, 08.10.2020: E-Mail*. 2020
- [Heldens u. a. 2018] HELDENS, P. ; HESTERMANN, F. ; JUNGE, M. ; SCHOTT, F. ; WANDERSEE, P.: *GreenSailer: Step by step guide*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Diss., 2018
- [Horsmann 2019] HORSMANN, Thomas ; N-TV NACHRICHTENFERNSEHEN GMBH (Hrsg.): *Superspeicher für Wasserstoff: LOHC soll Energiewende retten*. <https://www.n-tv.de/wissen/LOHC-soll-Energiewende-retten-article20974248.html>. Version: 2019
- [Hurford u. Barker 2020] HURFORD, Hannah ; BARKER, Charlie: *The Potential for Sail Cargo and Travel: A Market overview 2020*. 2020

[Hydrogenious LOHC Technologies GmbH 2110] HYDROGENIOUS LOHC TECHNOLOGIES GMBH: *Making hydrogen a global commodity: Examples from large scale project developments*. Berlin, 21.10.2019

[IMO 2008] IMO: *Resolution MSC.281(85): Explanatory notes to the SOLAS chapter II-1 subdivision and damage stability regulations*. 2008

[IMO 2015] IMO: *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014: Executive Summary and Final Report*. Suffolk, UK, 2015

[Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik 2019] INSTITUT FÜR SEEVERKEHRSWIRTSCHAFT UND LOGISTIK: *CO₂-neutrale Schifffahrt – im Spannungsfeld zwischen technischen Möglichkeiten, ökologischer Vernunft sowie ökonomischer und politischer Interessen: ISL-Thesenpapier 2019*. 2019

[International Maritime Organization 1999] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION: *Guidance on the implementation of IMO model courses*. London, UK, 1999

[International Maritime Organization 2020] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION: *IMO Model Courses*. <http://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/TrainingCertification/Pages/ModelCourses.aspx>. Version: 2020

[Jachtbouw Actueel 1110] JACHTBOUW ACTUEEL: *Why is the Dynarig unloved? Spineless owners!* <https://www.jachtbouwactueel.nl/why-is-the-dynarig-unloved-spineless-owners/>. Version: 11.10.2018

[Kovacic] KOVACIC, Goran: *Methanol in Großmotoren*. <https://www.vsm.de/de/presseinformation/7818>

[Kunst 2018] KUNST, Michael: Lastensegler: Zwei Neubauprojekte in Frankreich – 22 und 136m Länge, Zwei- und Viermaster. In: *SegelReporter* (2018). <https://segelreporter.com/panorama/lastensegler-zwei-neubauprojekte-in-frankreich-22-und-136m-laenge-zwei-und-vierm>

[Kunst 2019] KUNST, Michael: Lastensegeln: Schoner-Neubau „Votaan“ auf Kiel gelegt – „süße“ Transat-Routen. In: *SegelReporter* (2019). <https://segelreporter.com/panorama/lastensegeln-schoner-neubau-votaan-auf-kiel-gelegt-suesse-transat-routen/>

[Larsson u. a. 2016] LARSSON, Lars ; ELIASSON, Rolf E. ; ORYCH, Michal: *Principles of Yacht Design*. Fourth edition. Camden, Maine : International Marine/McGraw-Hill Education, 2016. – ISBN 978-0-07-182640-2

- [Löll 2020] LÖLL, Detlev ; ELGER, David (Hrsg.): *Rig costs: phone call*. 2020.08.05
- [Lorberg 2021] LORBERG, Cedric: *Untersuchung der potenziellen wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit eines umweltfreundlichen Schiffes im Rahmen des Projektes GreenSailer*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Bachelorarbeit, 2021
- [Lüken 2019] LÜKEN, Ingo: *Auslegung einer Hybrid-Propulsionsanlage und einer CO₂-Emissionsarmen Gesamtenergieversorgung für einen Küstenfrachtsegler*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Bachelorarbeit, 2019
- [MagnaGen GmbH 2020] MAGNAGEN GMBH: *Anleitung zur Kraftstoffverbrauchsrechnung eines Notstromaggregats*. <https://www.notstromdiesel.com/service/leitfaeden-und-merkblaetter/verbrauchsrechnung>.
Version: 2020
- [Marchaj 1991] MARCHAJ, Czeslaw A.: *Aerodynamik und Hydrodynamik des Segelns*. 2., überarb. und erw. Aufl. Bielefeld : Delius Klasing, 1991. – ISBN 3-7688-0729-0
- [Marchaj 1997] MARCHAJ, Czesław A.: *Die Aerodynamik der Segel: Theorie und Praxis*. Bielefeld : Delius Klasing, 1997. – ISBN 3-7688-1017-8
- [Mettig 1973] METTIG, Hermann: *Die Konstruktion schnelllaufender Verbrennungsmotoren*. Reprint 2019. Berlin and Boston : De Gruyter, 1973 (De Gruyter Lehrbuch). – ISBN 3110832267
- [Newell 2020] NEWELL, Alison ; FIJI SHORES AND MARINAS (Hrsg.): *A low carbon shipping future?* <https://www.fijimarinas.com/a-low-carbon-shipping-future/>. Version: 2020
- [Ouchi u. Omiya 2019] OUCHI, Kazuyuki ; OMIYA, T.: Zero emission sailing ship - conceptual design -. In: THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS (Hrsg.): *International Conference on Wind Propulsion*, 2019. – ISBN 978-1-909024-97-7, S. 79–82
- [Picuki 2020] PICUKI: *#dynarig Instagram Posts*. <https://www.picuki.com/tag/dynarig>. Version: 2020
- [Quignon 2017] QUIGNON, Sophie: *Konzeptstudie - Sicherheits- und Brandschutzrüstung für den GreenSailer*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Bachelorarbeit, 2017
- [Reimer Rechtsanwälte 1420] REIMER RECHTSANWÄLTE: Insolvenzverfahren "Segelreederei Kapitän Hass". In: *Presseportal.de* (1.4.2016). <https://www.presseportal.de/pm/111905/3290246>

- [Richter 0420] RICHTER, Martin ; ELGER, David (Hrsg.): *Stabilitätsberechnung eines Segelschiffes: E-Mail*. 04.2019
- [Sahnen u. a. 2019] SAHNEN, Daniel ; UNTIEDT, Gerhard ; NAGEL, Rolf ; SCHRÖDER, Dirk: Methanol als Grundbrennstoff für die Schifffahrt. In: *Schiff und Hafen* (2019), Nr. 09, S. 20–26
- [Scharping 1994] SCHARPING, Horst D.: *Konstruktion und Bau von Yachten*. 2., überarb. und erw. Aufl. Bielefeld : Delius Klasing, 1994. – ISBN 3768807819
- [Schenzle 2018] SCHENZLE, Peter: *Technik und Strömungsmechanik von Segelschiffen*. Hamburg, TUHH, Lecture notes, 2018
- [Schindler u. Schmidt 2004] SCHINDLER, Jörg ; SCHMIDT, Patrick: *Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg: Studie im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Gesundheit: Endbericht*. 2004
- [Schön 2019] SCHÖN, Florian: *Cargo Yacht: Konzept und Gestaltung eines modernen Lastenseglers unter ökologischen und ökonomischen Aspekten*. Bremen, Hochschule für Künste, Masterarbeit, 2019
- [Schön 2020] SCHÖN, Florian: *Cargo Yacht: Gestaltung*. Bremen, Hochschule für Künste, Plakat, 2020
- [Sheahan 1992] SHEAHAN, Matthew: *Das Rigg: Auswahl, Wartung, Tuning*. 1. Aufl. Bielefeld : Delius Klasing, 1992. – ISBN 3–7688–0747–9
- [ShipTechnology 2021] SHIPTECHNOLOGY: *MS Beluga SkySails – Cargo Ship*. <https://www.ship-technology.com/projects/msbelugaskysails/>. Version: 2021
- [Slinn 1020] SLINN, Tony: Inland empire: Dutch ship developer PortLiner is building a new generation of inland container carrier using a hydrogen-based propulsion system. Version: 10.2019. <https://www.ukimediaevents.com/publication/d171b4eb/34>. In: UKI MEDIA AND EVENTS (Hrsg.): *Malizia II*. Willenhall, UK, 10.2019, 31–34
- [SOLAS 2002] SOLAS: *SOLAS chapter V: Safety of navigation*. 2002
- [Sonnenberg 2019] SONNENBERG, Nils: *Ruderentwurf für einen modernen Frachtensegler: Eine Untersuchung von Entwurfsmodellen am Beispiel des GreenSailer*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Bachelorarbeit, 2019

- [Stanek 2222] STANEK, Julia: Sylt-Reise per Segelfrachter: Das Traumschiff. In: *DER SPIEGEL* (22.2.2013). <https://www.spiegel.de/reise/deutschland/segeltoern-von-hamburg-nach-sylt-reise-auf-einem-gaffelschoner-a-884588.html>
- [Stolzenburg 2019] STOLZENBURG, Klaus: *Speicheroptionen für Wasserstoff*. 2019
- [Strasser 2020] STRASSER, Sascha ; ELGER, David (Hrsg.): *Kurzbeschreibung Windantriebe: E-Mail*. 2020
- [Thaotaku 2020] THAOTAKU, Chumpon: *Calculating the rigs of the Green Sailor using nonlinear Finite Element Methods*. Leer, Hochschule Emden/Leer, Maritime Project, 2020
- [TOWT 2020] TOWT: *TOWT - Transport à la voile : accueil*. <https://www.towt.eu/?lang=en>. Version: 2020
- [TROTEC 2020] TROTEC: *Leistungsberechnung von Klimageräten: Berechnen Sie ungefähr die benötigte Leistung für Ihr Klimagerät – in unserem praktischen Online-Kalkulator*. [https://de.trotec.com/produkte-services/maschinen-homecomfort/klimatisierung/kapazitaetsberechnung-klimatisierung/?tx_tklinfo_tklinfopi\[action\]=airconditioning&tx_tklinfo_tklinfopi\[controller\]=Calculator&cHash=223bd78013ddc04e47c92abc0d22f197](https://de.trotec.com/produkte-services/maschinen-homecomfort/klimatisierung/kapazitaetsberechnung-klimatisierung/?tx_tklinfo_tklinfopi[action]=airconditioning&tx_tklinfo_tklinfopi[controller]=Calculator&cHash=223bd78013ddc04e47c92abc0d22f197). Version: 2020
- [Tunér u. a. 2018] TUNÉR, Martin ; AAKKO-SAKSA, Päivi ; MOLANDER, Patrik: *SUMMETH - Sustainable Marine Methanol: Deliverable D3.1: Engine Technology, Research, and Development for Methanol in Internal Combustion Engines*. 2018
- [Vahs 2018] VAHS, Michael: *Training Curriculum Flettner-Rotor Familiarization Fehn Pollux*. Leer, 2018
- [van der Bles u. Nieuwenhuis 2019] VAN DER BLES, A. A. ; NIEUWENHUIS, F.: Optimal application of wind assisted propulsion on existing short sea cargo vessels. In: THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS (Hrsg.): *International Conference on Wind Propulsion*, 2019. – ISBN 978-1-909024-97-7, S. 119-125
- [van der Kolk u. a. 2016] VAN DER KOLK, N. J. ; KEUNING, J. A. ; HUIJSMANS, R.H.M.: Hydrodynamics of wind-assisted ship propulsion: verification of RANS simulations. In: *The 12th International Conference on Hydrodynamics* (2016)
- [Verband für Schiffbau und Meerestechnik E.V.] VERBAND FÜR SCHIFFBAU UND MEERESTECHNIK E.V.: *Pressespiegel: 29. Woche 2020*

- [Volland 2013] VOLLAND, Leena: *Der pro-Kopf-Wasserverbrauch in Deutschland: Eine Übersicht.* <https://nachhaltig-sein.info/privatpersonen-nachhaltigkeit/der-pro-kopf-wasserverbrauch-in-deutschland-eine-ubersicht>.
Version: 2013
- [VPLP Design 2020] VPLP DESIGN: *OceanWings: VPLP Design launches Oceanwings: The Reefable and Furlable Automated Wingsail.* <https://vplp.fr/realisation/oceanwings/58.html>. Version: 2020
- [Wagner 1968] WAGNER, B.: Schrägschleppversuche für einen Seglerrumpf mit und ohne Balkenkiel und fuer den Mariner. In: *Schriftenreihe Schiffbau* (1968), Nr. 186
- [Wenger 2008] WENGER, David: *Metallhydridspeicher zur Wasserstoffversorgung und Kühlung von Brennstoffzellenfahrzeugen.* München, Technische Universität München, Diss., 2008
- [Wuersig 2019] WUERSIG, Gerd: *Are batteries an option in shipping? An intro to batteries in maritime.* 2019
- [Zhenjiang Matchau Marine Equipment 2020] ZHENJIANG MATCHAU MARINE EQUIPMENT: *Fire Fighting Appliance.* https://matchau.en.alibaba.com/productgroupdetail-801471063/Fire_Fighting_Appliance.html?spm=a2700.icbuShop.88.30.19323adenZUr19. Version: 2020

Abkürzungsverzeichnis

AIS	automatic identification system
AP	aft perpendicular, hinteres Lot
AP	Arbeitspaket
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BRZ	Bruttoraumzahl
CFD	Computational Fluid Dynamics
COG	course over ground
DNV GL	Det Norske Veritas + Germanischer Lloyd
DST	Development Centre for Ship Technology and Transport Systems, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EPRIB	Emergency Position Indicating Radio Beacon
FEA	Finite Element Analysis
FSS-Code	International Code for Fire Safety Systems
GPS	global positioning system
GSN	GreenShipping Niedersachsen
GT	gross tons
HSVA	Hamburgische Schiffbau- und Versuchsanstalt
IMO	International Maritime Organization
ITTC	International Towing Tank Conference

LNG	liquified natural gas
LOHC	liquid organic hydrogen carrier
MCR	maximum continuous rating
MTV	Manteltarifvertrag
NAPA	Naval Architectural Package
NMC	Lithium Nickel Mangan Cobalt Oxid
NOK	Nord-Ostsee-Kanal
Pax	persons approximately
PBA	Projektbegleitender Ausschuss
PEM	proton exchange membrane, Polymerelektrolyt-Membran
RoRo	Roll on, Roll off
rpm	revolutions per minute
SART	search and rescue transponder
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
TEU	twenty-foot equivalent unit
TOWT	TransOceanic Wind Transport
VCG	vertical center of gravity, = ZCG
WLL	working load limit
WPS	wind propulsion system, = WZA
WS	Wellenspektrum
WZA	Windzusatzantrieb

Nomenklatur

$a_1 - a_7$	-	Koeffizienten	[-]
A	-	Windangriffsfläche	[m ²]
A	-	Unterteilungsindex	[-]
A	-	Lagerkraft	[N]
A_S	-	Segelfläche	[m ²]
A_T	-	Tunnel-Querschnittsfläche	[m ²]
b	-	Driftwinkel im Diagramm	[-]
$b_1 - b_6$	-	Koeffizienten	[-]
B	-	Schiffsbreite	[m]
B	-	Lagerkraft	[N]
c	-	Beiwert	[-]
c, c_0	-	Spezifischer Schub	[N/kW]
c_1	-	Faktor für die Ruderfläche	[-]
c_B	-	Blockkoeffizient	[-]
c_D	-	Widerstandskoeffizient	[-]
c_L	-	Auftriebskoeffizient	[-]
c_R	-	Vortriebsbeiwert	[-]
C	-	Brennstoffverbrauch	[m ³]
C	-	Lagerkraft	[N]
C_1, C_2	-	Integrationskonstante	[-]
C_{AW}	-	Zusatzwiderstandsbeiwert durch Wellen	[-]
d	-	Rohrdurchmesser	[mm]
d_1	-	maximaler Durchmesser der Säule unter dem Rotor	[m]
D	-	Reisezeit	[d]
D	-	Propellerdurchmesser	[m]
D	-	Höhe vom Kiel bis zum Schottdeck	[m]
E	-	Elastizitätsmodul	[N/m ²]
f	-	Krängungswinkel im Diagramm	[-]
f	-	Verhältnis Schub zu Lateralfläche	[N/m ²]
F	-	Segelkraft	[N]
F_D	-	Widerstandskraft	[N]
F_K	-	Seitenkraft bezogen auf Kurs über Grund	[N]

F_L	-	Auftriebskraft	[N]
F_R	-	Vorwärtskraft bezogen auf Kurs über Grund	[N]
F_T	-	Gesamtkraft	[N]
F_X	-	Vorwärtskraft im Schiffskordinatensystem	[N]
F_Y	-	krängende Kraft im Schiffskordinatensystem	[N]
g	-	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
\overline{GM}	-	Abstand vom Gewichtsschwerpunkt zum Metazentrum	[m]
$GM0$	-	Anfangsstabilität	[m]
GZ	-	Hebelarm	[m]
h_1	-	Höhe von der Wasserlinie zur unteren Endscheibe des hinteren Flettner-Rotors	[m]
h_{KW}	-	Hebelarm des lateralen Winddrucks	[m]
I	-	Flächenträgheitsmoment	[m ⁴]
K_1	-	Faktor	[-]
\overline{KB}	-	Abstand Kiel - Auftriebsschwerpunkt	[m]
K_Q	-	Momentenbeiwert	[-]
K_T	-	Schubbeiwert	[-]
l_1	-	Abstand von der Masteinspannung zum Angriffspunkt der Segelkraft F	[m]
l_2	-	Abstand vom Angriffspunkt der Segelkraft F zur Mastspitze	[m]
L_{PP}	-	Länge zwischen den Loten	[m]
LWL	-	Länge der Wasserlinie	[m]
M	-	Moment	[Nm]
M_A	-	Lagermoment	[Nm]
M_W	-	krängendes Moment durch Wind	[Nm]
M_X	-	Moment in x-Richtung	[Nm]
MXH	-	vertikales Flächenmoment	[Nm]
MXL	-	horizontales Flächenmoment	[Nm]
M_Y	-	krängendes Moment	[Nm]
n	-	Drehzahl	[1/min]
N	-	Normalkraft	[N]
N_e	-	Gesamtleistung	[kW]
P	-	Winddruck	[N/m ²]
P	-	Propellersteigung	[m]
P	-	Leistung	[kW]
P_0	-	Leistung Querstrahler	[kW]
P_B	-	Bremsleistung	[kW]

P_D	-	Wellenleistung	[kW]
P_{el}	-	Elektrische Leistung	[kW]
P_E	-	Effektive Leistung	[kW]
P_T	-	Schubleistung	[W]
q	-	Flächenlast	[N/m]
q_W	-	Abzuführende Wärmemenge	[kcal/PSh]
Q	-	Batterie-Kapazität	[Ah]
Q	-	Pumpen-Kapazität	[m ³]
Q	-	Querkraft	[N]
R	-	benötigter Unterteilungsindex	[-]
R_{AW}	-	Zusatzwiderstand durch Wellen	[N]
R_T	-	Glattwasserwiderstand	[N]
R_{TS}	-	Gesamtwiderstand des Schiffes	[N]
$R_{T,Sturm}$	-	Glattwasserwiderstand + Windwiderstand + See- gangwiderstand	[N]
$R_{T,Wind}$	-	Windwiderstand	[N]
t	-	Sogziffer	[-]
t	-	Zeit	[h]
T	-	Tiefgang	[m]
T_{Prop}	-	Propellerschub	[N]
U_{max}	-	Maximale Batteriespannung	[kW]
v_A	-	Anströmgeschwindigkeit, Geschwindigkeit des schein- baren Windes	[m/s]
v_{Ax}	-	x-Komponente der Geschwindigkeit des scheinbaren Windes	[m/s]
v_{Ay}	-	y-Komponente der Geschwindigkeit des scheinbaren Windes	[m/s]
v'_j	-	Jet-Geschwindigkeit	[m/s]
v_S	-	Schiffsgeschwindigkeit	[m/s]
v_{Sx}	-	x-Komponente der Schiffsgeschwindigkeit	[m/s]
v_{Sy}	-	y-Komponente der Schiffsgeschwindigkeit	[m/s]
v_W	-	Geschwindigkeit des wahren Windes [m/s]	[m/s]
v_{Wx}	-	x-Komponente der Geschwindigkeit des wahren Win- des	[m/s]
v_{Wy}	-	y-Komponente der Geschwindigkeit des wahren Win- des	[m/s]
V	-	Strömungsvolumen	[m ³]
V	-	Volumen der umschlossenen Räume	[m ³]
V_{kW}	-	Verbrauch des Generators	[l/h]

V_{spez}	-	Spezifischer Verbrauch	[g/kWh]
V_W	-	Zu fördernde Wassermenge	[m ³ /h]
w	-	Nachstromziffer	[-]
w	-	Durchbiegung	[m]
w'	-	Steigung	[°]
X	-	Auflagerkraft	[N]
XCG	-	Gewichtsschwerpunkt in x-Richtung	[m]
XH	-	vertikaler Abstand zur Design-Wasserlinie	[m]
XL	-	horizontaler Abstand des Flächenschwerpunktes zum hinteren Lot	[m]
Y_0	-	Jet-Querkraft	[N]
YCG	-	Gewichtsschwerpunkt in y-Richtung	[m]
z	-	Koordinate	[-]
Z	-	vertikaler Hebelarm zwischen dem aerodynamischen und dem hydrodynamischen Druckpunkt	[m]
ZCG	-	Gewichtsschwerpunkt in z-Richtung	[m]
α	-	Anströmwinkel	[°]
β	-	Driftwinkel	[°]
γ_A	-	Richtung des scheinbaren Windes	[°]
γ_W	-	Richtung des wahren Windes	[°]
δ	-	Winkel des Sichtstrahls zur Wasseroberfläche	[°]
ε	-	halber Winkel der Sichtstrahlabdeckung	[°]
ζ_A	-	Wellenamplitude	[m]
η_0	-	Propellerwirkungsgrad	[-]
η_{Gen}	-	Wirkungsgrad des Generators	[-]
η_H	-	Schiffseinflussgrad	[-]
η_R	-	Gütegrad der Anordnung	[-]
η_S	-	Wirkungsgrad der Antriebswelle	[-]
θ	-	Richtung des scheinbaren Windes bezogen auf Norden	[°]
ϑ	-	Schiffskurs	[°]
λ	-	Schnelllaufzahl	[-]
ρ	-	Wasserdichte	[kg/m ³]
ρ_A	-	Luftdichte	[kg/m ³]
φ	-	Krängungswinkel	[°]
ω_E	-	Begegnungsfrequenz	[rad/s]
∇	-	Verdrängung	[m ³]

Abbildungsverzeichnis

0.1. Organisationsstruktur des Kompetenzzentrums GreenShipping Niedersachsen	8
0.2. Modell in Teamcenter	11
1.3. Entwurf des Greenheart-Seglers (Greenheart, 2015)	14
1.4. Entwurf des „Smart Sailing Cargo Ship“ (TOWT, 2020)	14
1.5. Entwurf des „EcoClipper500“ (EcoClipper, 2020)	15
1.6. Entwurf des Autofrächters von Neoline (Kunst, 2018)	16
1.7. Die <i>Maruta Jaya 900</i> mit dem Indosail-Rigg	19
1.8. Die sich aktuell im Bau befindliche <i>Ceiba</i>	19
1.9. Schokoladensegler <i>Votaan</i> (Kunst, 2019)	20
1.10. Schema zur Wasserstoffnutzung (Celtic Cruises, 2020)	21
1.11. Übersicht über derzeitige Windzusatzantriebe. Quellen von oben nach unten: Germann (2906), ACADEMIC (2020), Econowind (2020), van der Bles u. Nieuwenhuis (2019), VPLP Design (2020), Jachtbouw Actueel (1110), Picuki (2020), ShipTechnology (2021), Ebeling (2006)	25
1.12. Reales Fahrprofil eines existierenden Inselversorgermotorschiffes von Cuxhaven nach Helgoland	28
1.13. Fahrtzeit des GreenSailers unter Segeln oder mit zwei 24 m hohen Flettner-Rotoren im Vergleich zu einem Motorschiff von Cuxhaven nach Helgoland	29
2.14. Raumübersicht	46
2.15. Lage der Schotte und Decks sowie der Masten oder Rotoren	49
2.16. Linienriss nach dem Entwurf von Herrn Glacier	50
2.17. Vergleich der Widerstandsprognosen in Paramarine (Andersen), NAPA (Holtrop 84) und gemessener Widerstand des Schiffmodells (DST)	52
2.18. Vergleich der Widerstandsprognosen in Paramarine, NAPA und des gemessenen Widerstandes vom Schiffmodell	53
2.19. Widerstand des Schiffmodells unter Drift und Krängung (hochgerechnet auf die Großausführung); b = Driftwinkel, f = Krängungswinkel	54
2.20. Zusatzwiderstand durch Drift, hier bei 7,6 kn	54
2.21. Zu erwartende Schiffsgeschwindigkeit unter Segeln bei 30° Anstellwinkel, 6 Bft Wind, wahrer Wind 60°	55

2.22. Wellenprofil bei 8 kn Fahrt	56
2.23. Wellenprofil bei 12 kn Fahrt	57
2.24. Seitenansicht des berechneten Wellenprofils bei 12 kn Fahrt	58
2.25. Seitenansicht des Wellenprofils am Modell bei 12 kn Fahrt (Friedhoff u. Tenzer, 2018)	58
2.26. Seitenansicht des simulierten Wellenprofils bei 12 kn Fahrt	59
2.27. Vorschlag eines Hecks mit definierter Abrisskante	59
2.28. Wellenbild bei 12 kn Fahrt, 0° Drift, 0° Krängung (Friedhoff u. Tenzer, 2018)	59
2.29. Wellenbild bei 12,5 kn Fahrt, 16° Drift, 10° Krängung (Friedhoff u. Tenzer, 2018)	59
2.30. Zusatzwiderstandsbeiwert c_{AW} für regulären Seegang von vorne bei 10 kn Fahrt und mit der Wellenamplitude $\zeta_A = 0,66$ m in der Groß- ausführung (Friedhoff u. Tenzer, 2018)	60
2.31. Rollbewegung in irregulärem Seegang von vorne bei verschiedenen Driftwinkeln bei 11,45 kn (Friedhoff u. Tenzer, 2018)	60
2.32. Umwandlung Energie - Wasserstoff - Speicherung in LOHC - Wasser- stoff - Energie (H2-Industries, 2019)	68
2.33. Flächen unter Hebelarmkurven	75
3.34. Drei ähnliche Schiffe im Vergleich zum GreenSailer	82
3.35. Linienrisse der Vergleichsschiffe	83
3.36. Unterschiedliche Bauweise und Raumgestaltung der Schiffe Greenhe- art (links) und Amazone (rechts)	83
3.37. Raumaufteilung und Querschnitte der Schiffe Amazone (links), Green- heart (mitte) und des ursprünglichen GreenSailers (rechts)	85
3.38. Ausgangsentwurf nach Glacer	85
3.39. Auslegungsmodell der Stahlstruktur in modifizierter Bauweise	87
3.40. Plattenstärken am Hauptspant	89
3.41. Beispielhafte Spannung und Verformung eines Decks bei konstanter Lastaufbringung	89
3.42. Detailliertes Modell in Teamcenter	91
4.43. Lateraldruckpunkt bei Drift	96
4.44. Lateraldruckpunkt bei Drift und Krängung	96
4.45. Aerodynamische Kräfte (Marchaj, 1991)	98
4.46. Iterationsschema zur Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit (Elger u. a., 2020)	102
4.47. Zu erwartende Geschwindigkeit des GreenSailers in kn bei 6 Bft Wind, ohne Berücksichtigung von Drift- und Ruderwiderstand	103

4.48. Vorwärtskraft eines Hochsegelriggs oder von zwei großen Flettner-Rotoren in kN bei wahren Wind aus verschiedenen Richtungen . . .	104
4.49. Maximal erreichbare Schiffsgeschwindigkeit mit einem Hochsegel-Rigg oder Flettner-Rotoren	105
4.50. Die Sichtstrahlabdeckung darf maximal 5° betragen.	107
4.51. Der Sichtstrahl in der Seitenansicht	107
4.52. Zerlegung des Balkenmodells in zwei Teilsysteme	109
4.53. Schnittlasten an den beiden Teilsystemen	110
4.54. Gitter für CFD-Untersuchungen (Heldens u. a., 2018)	113
4.55. Um die Körper wird das Gitter immer feiner (Heldens u. a., 2018). . .	113
4.56. Stromlinien um die Segel (Heldens u. a., 2018)	114
4.57. Stromlinien um das Schiff (Heldens u. a., 2018)	114
4.58. Geschwindigkeitsfeld um die Segel (Heldens u. a., 2018)	115
4.59. Druckfeld um die Segel (Heldens u. a., 2018)	116
4.60. Auf die Masten wirkenden Kräfte im FE-Modell (Thaotaku, 2020) . .	117
4.61. Gewählte Durchmesser der Salinge und Wanten im FE-Modell (Thaotaku, 2020)	118
4.62. Deformation der Masten im FE-Modell (Thaotaku, 2020)	118
4.63. Buckling der Masten im FE-Modell (Thaotaku, 2020)	119
5.64. Einfluss der chemischen Zusammensetzung einer Batterie (Wuersig, 2019)	
NMC - Lithium Nickel Mangan Cobalt Oxid	
LMO - Lithium Mangan Oxid	
NCA - Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxid	
LCO - Lithium Cobalt Oxid	
LFP - Lithium Iron Phosphat	
LTO - Lithium Titanium Oxid	126
5.65. Schematische Übersicht der Hauptkomponenten im Maschinenraum .	128
5.66. Schematische Darstellung eines beispielhaften Schaltschranks (Hakkinen, 2008)	129
5.67. Entwurf der Brückengestaltung (Besserer, 2016)	137
6.68. Mögliche Anordnung der Rettungsringe	143
6.69. Sicherheitseinrichtungen auf dem Brückendeck	146
6.70. Feuerlöscheinrichtungen auf dem Poopdeck	147
6.71. Feuerlöscheinrichtungen auf dem Wohndeck	148
6.72. Brandschutzausrüstung (Zhenjiang Matchau Marine Equipment, 2020)	150
6.73. Fluchttreter (Zhenjiang Matchau Marine Equipment, 2020)	151
6.74. Seitliches Beladen (Schön, 2019)	152
6.75. Seitliches Beladen mit Gabelstapler (Schön, 2019)	152

A.1. Kurven der Hydrostatik	191
A.2. Beladungstabelle	192
A.3. Trimm-Kurven	193
A.4. Leckstabilitätsrechnung für die Segelkonfiguration als Passagierschiff .	199
A.5. Leckstabilitätsrechnung für die Segelkonfiguration als Frachtschiff . .	199
A.6. Leckstabilitätsrechnung für die Flettner-Konfiguration als Passagier- schiff	200
A.7. Leckstabilitätsrechnung für die Flettner-Konfiguration als Frachtschiff	200
A.8. Leckstabilitätsrechnung, Maximaltiefgang, Segel, Frachtschiff	201
A.9. Leckstabilitätsrechnung, Maximaltiefgang, Segel, Passagierschiff . . .	201
A.10. Leckstabilitätsrechnung, Maximaltiefgang, Flettner, Frachtschiff . . .	201
A.11. Leckstabilitätsrechnung, Max.-Tiefgang, Flettner, Passagierschiff . . .	201
A.12. Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Segel, Frachtschiff	202
A.13. Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Segel, Passagierschiff	202
A.14. Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Flettner, Frachtschiff	202
A.15. Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Flettner, Passagierschiff . .	202
A.16. Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Segel, Frachtschiff	202
A.17. Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Segel, Passagierschiff	202
A.18. Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Flettner, Frachtschiff	203
A.19. Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Flettner, Passagierschiff	203
A.20. Freibordrechnung	204
A.21. Fortsetzung der Freibordrechnung	205
A.22. Decksmodell	206
A.23. Lasten über Funktionale Elemente	207
A.24. Lasten und resultierende Spannungsverläufe	208
A.25. Der Flächenschwerpunkt eines Hochsegels liegt bei $1/3 h$ auf der Sei- tenhalbierenden e	212
A.26. Berechnung des Flächenschwerpunkts an einem Stagesegel.	214
A.27. Erreichbare Schiffsgeschwindigkeit in kn mit einem Hochsegel-Rigg oder Flettner-Rotoren	216

Tabellenverzeichnis

2.1. Zwei Konfigurationen für die Stabilitätsberechnungen in NAPA	79
2.2. Beladungsfälle für die Leckstabilitätsberechnungen in NAPA: 1) Deepest subdivision draught (DS), 2) Partial subdivision draught (DP), 3) Light service draught (DL)	80
3.3. Lightweight	91
4.4. Vergleich von Segelantrieben	93
4.5. Segelabmessungen	94
4.6. Geometrische Lage der Lateraldruckpunkte (Flächenschwerpunkte)	95
4.7. Koeffizienten für die Schiffsgeschwindigkeit und den Driftwinkel (Friedhoff u. Tenzer, 2018)	100
4.8. Maximal auftretende Kräfte bei 7 Bft	106
4.9. Positionen der kleinen Flettner-Rotoren im Schiffskoordinatensystem	108
4.10. Positionen der Hochsegel-Masten im Schiffskoordinatensystem	112
5.11. Energiebedarf des GreenSailers bei Schlechtwetter im Sommer *1 Prozentsatzanteil des Energieverbrauchs (3600 kWh) eines fünf Personen Haushalts in einem Mehrfamilienhaus pro Jahr *2 Umrechnung des Prozentsatzanteils auf den Energiebedarf von 20 Personen pro Stunde *3 Die Angaben wurden aus den Anbieterseiten entnommen, siehe Anlagen von Lüken (2019) *4 Für 1000 m ³ Aufenthaltsräume (TROTEC, 2020)	121
5.12. Systeme und Komponenten im Hauptmaschinenraum	135
5.13. Systeme und Komponenten im zweiten Maschinenraum mittschiffs	136
5.14. Forschungsfundamente	140
7.15. Zeitplan des Model Course (Vahs, 2018)	156
7.16. Handhabung des Segelsystems (Vahs, 2018)	157
7.17. Navigation (Vahs, 2018)	157
7.18. Manövrieren des Schiffes (Vahs, 2018)	158
7.19. Besonderheiten der Intaktstabilität unter Verwendung eines Segelsystems (Vahs, 2018)	158
7.20. Sicherheit (Vahs, 2018)	159
7.21. Technologie des Segelsystems (Vahs, 2018)	159
8.22. Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	168

A.1. Grauwasser und Schwarzwasser pro Person und Tag	193
A.2. Modellierung	207
A.3. Bauspantenraster	210
A.4. Eigenschaften des CFD-Gitters (Heldens u. a., 2018)	216

A. Anhang

A.2. Schiffsentwurf

A.2.1. Hydrostatik

Die in der Hydrostatik-Tabelle ausgegebenen Größen sind:

T	Draught (moulded)
DISP	Total displacement
DW	Deadweight
LCB	longitudinal centre of buoyancy
VCB	Vertical center of buoyancy
KMT	Transverse metacentric height
CB	Block coefficient
WLA	Waterline area
FRA	Total frame area
WSA	Wetted surface area
LWL	Length of waterline

T m	DISP t	DW t	LCB m	VCB m	KMT m	CB	WLA m2	FRA m2
2.500	728.0	298.0	29.469	1.531	5.805	0.4259	442.1	17.9
2.600	773.7	343.7	29.428	1.592	5.778	0.4353	450.3	18.9
2.700	820.1	390.1	29.388	1.652	5.756	0.4444	458.5	19.9
2.800	867.5	437.5	29.344	1.712	5.740	0.4534	466.4	21.0
2.900	915.8	485.8	29.299	1.772	5.728	0.4621	474.2	22.0
3.000	964.8	534.8	29.255	1.832	5.720	0.4707	482.0	23.1
3.100	1014.7	584.7	29.210	1.892	5.717	0.4791	489.7	24.2
3.200	1065.4	635.4	29.166	1.951	5.716	0.4874	497.3	25.3
3.300	1116.8	686.8	29.123	2.011	5.717	0.4954	504.7	26.4
3.400	1168.9	738.9	29.079	2.071	5.721	0.5034	512.0	27.4
3.500	1221.8	791.8	29.036	2.131	5.726	0.5112	519.2	28.6
3.600	1275.5	845.5	28.992	2.190	5.734	0.5188	526.3	29.7
3.700	1329.9	899.9	28.948	2.250	5.743	0.5264	533.2	30.8
3.800	1385.0	955.0	28.906	2.310	5.751	0.5338	540.1	31.9
3.900	1440.7	1010.7	28.865	2.369	5.763	0.5410	547.0	33.0
4.000	1497.2	1067.2	28.822	2.429	5.775	0.5482	553.5	34.2
4.100	1554.3	1124.3	28.779	2.488	5.789	0.5553	559.7	35.3
4.200	1612.1	1182.1	28.736	2.548	5.802	0.5623	565.8	36.5
4.300	1670.5	1240.5	28.695	2.607	5.816	0.5691	571.8	37.6
4.400	1729.6	1299.6	28.654	2.667	5.831	0.5759	577.7	38.8
4.500	1789.2	1359.2	28.614	2.726	5.846	0.5825	583.4	40.0

T m	WSA m2	LWL m
2.500	530	53.94
2.600	544	54.28
2.700	558	54.61
2.800	572	54.94
2.900	585	55.27
3.000	599	55.59
3.100	613	55.91
3.200	628	56.22
3.300	642	56.53
3.400	656	56.83
3.500	670	57.13
3.600	684	57.41
3.700	699	57.70
3.800	713	57.98
3.900	727	58.25
4.000	741	58.52
4.100	754	58.79
4.200	769	59.05
4.300	782	59.31
4.400	796	59.57
4.500	810	59.82

In Abbildung A.1 sind die Werte der Hydrostatik grafisch aufgetragen. Abbildung A.2 zeigt u.a. die Verdrängung bei unterschiedlichem Tiefgang in Abhängigkeit der Wasserdichte an. Abbildung A.3 zeigt das Verdrängungsmoment in Abhängigkeit des Trimms an. Eine ausführliche Wertetabelle existiert als Textdatei.

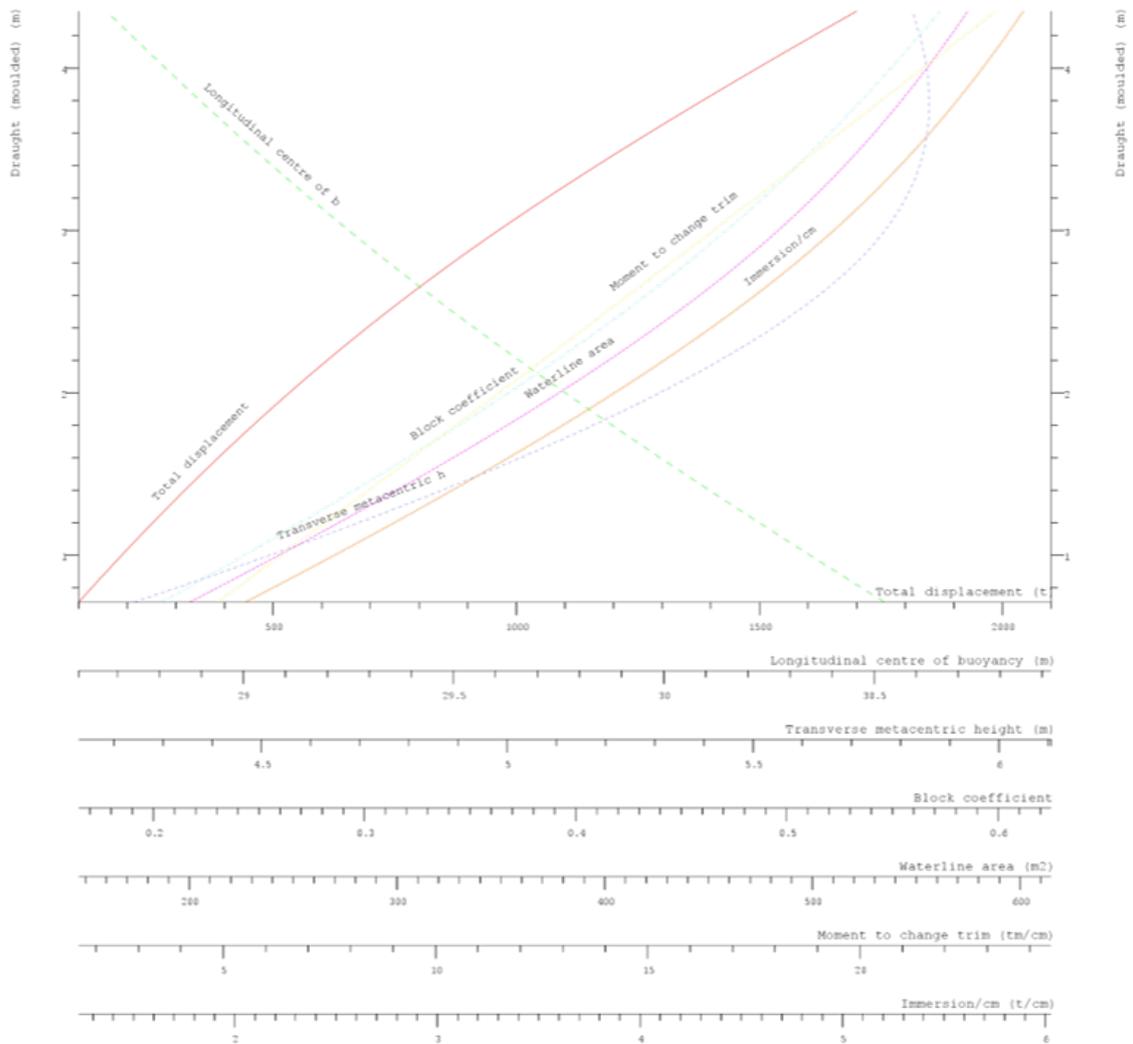


Abbildung A.1.: Kurven der Hydrostatik

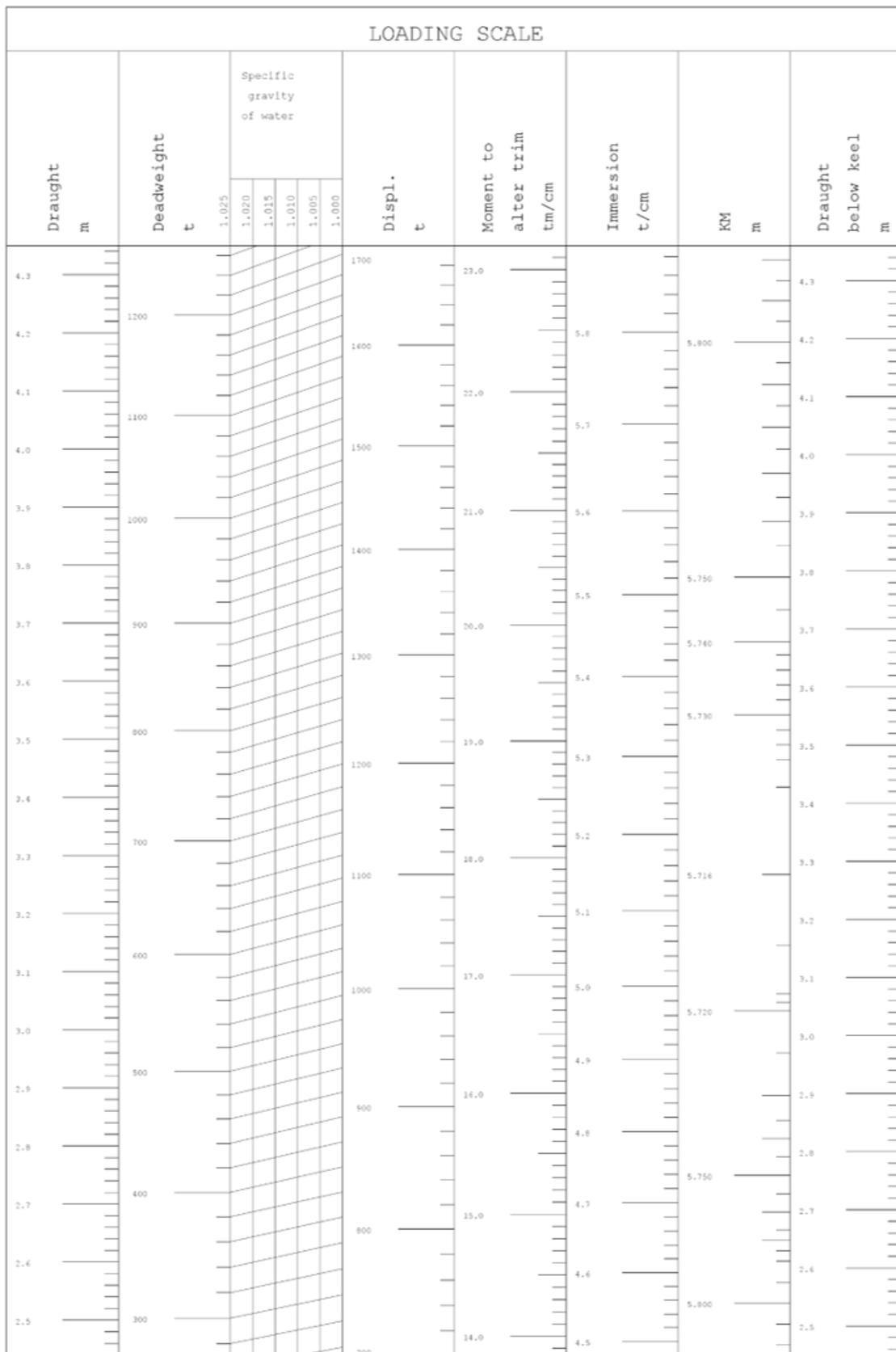


Abbildung A.2.: Beladungstabelle

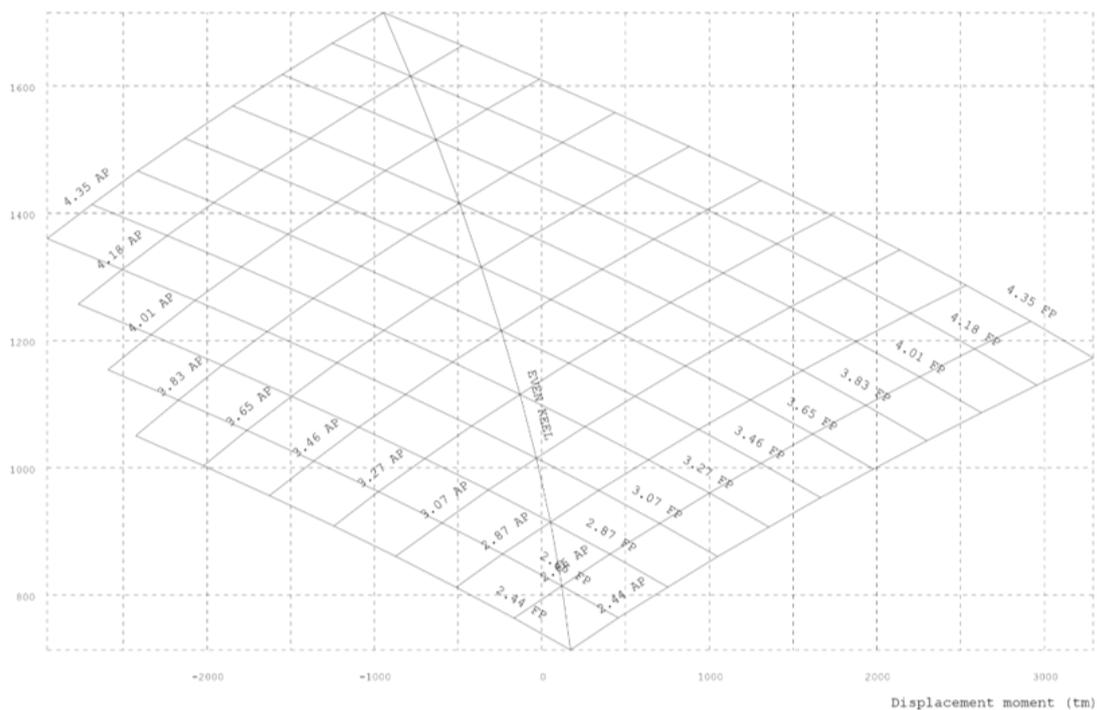


Abbildung A.3.: Trimm-Kurven

A.2.2. Frischwasserverbrauch

Der Pro-Kopf-Verbrauch eines Privatpersonenhaushalts (Volland, 2013) ist in Tabelle A.1 exemplarisch dargestellt.

Tabelle A.1.: Grauwasser und Schwarzwasser pro Person und Tag

Tätigkeit	Liter
Trinken	2
Kochen	3
Geschirr spülen	7
Körperpflege	44
Wäsche waschen	15
Putzen	7
Summe	78
Seewasser-Toilette	33
nach BG Verkehr (2014):	
Grauwasser Fahrgastschiff	160
Grauwasser sonst	110
Schwarzwasser	25

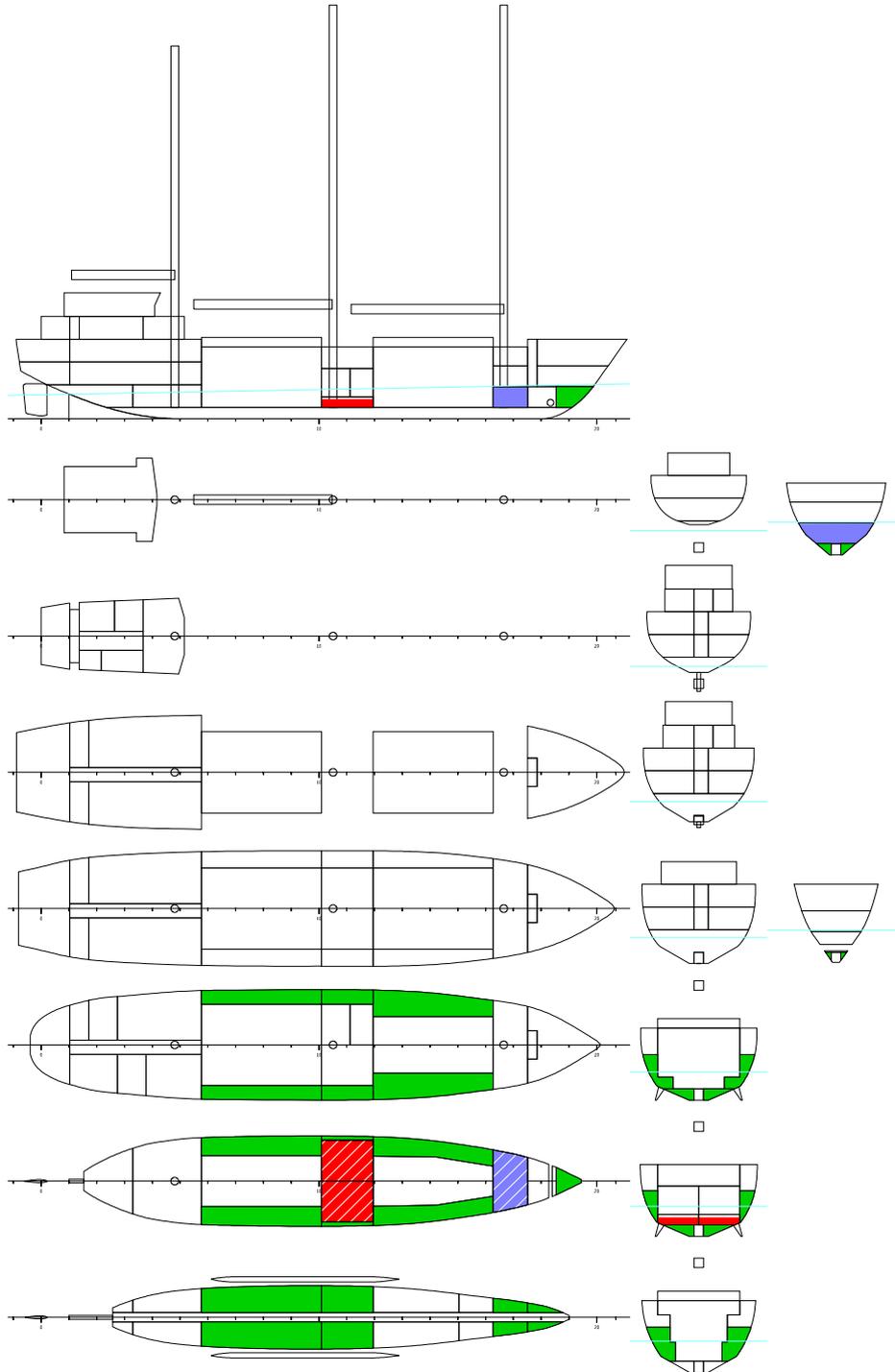
A.2.3. Intaktstabilitätsrechnung

Napa Oy
 NAPA/D/LD/170619
 GREENSAILER1/A
 GREENSAILER1

LOADING CONDITIONS

DATE 2019-04-25
 TIME 12:37
 USER DAVE
 1

LOADING CONDITION: SAILS_BALLAST -



LOAD	MASS t	XM m	YM m	ZM m	FRSM tm
Deadweight	599,8	33,18	0,00	3,65	638,99

Napa Oy
NAPA/D/LD/170619
GREENSAILER1/A
GREENSAILER1

LOADING CONDITIONS

DATE 2019-04-25
TIME 12:37
USER DAVE
2

Lightweight	430.0	27.30	0.00	4.96
Deadweight	599.8	33.18	0.00	3.65
Total weight	1029.8	30.73	0.00	4.19

Floating Position

Draught moulded	3.088 m	KM	5.56 m
Trim	1.076 m	KG	4.19 m
Heel, PS=+	0.0 deg		
TA	2.550 m	GM0	1.37 m
TF	3.626 m	GMCORR	-0.62 m
Trimming moment	1711 tonm	GM	0.75 m

Stability Criteria

RCR	TEXT	REQ	ATTN UNIT	STAT
AREA30	Area under GZ curve up to 30 deg.	0.055	0.122 mrad	OK
AREA40	Area under GZ curve up to 40 deg.	0.090	0.243 mrad	OK
AREA3040	Area under GZ curve btw. 30-40 deg.	0.030	0.121 mrad	OK
GZ0.2	Max GZ > 0.2	0.200	1.224 m	OK
MAXGZ25	Max. GZ at an angle > 25 deg.	25.000	66.560 deg	OK
GM0.15	GM > 0.15 m	0.150	0.748 m	OK
GM0.60	GM > 0.60 m	0.600	0.748 m	OK
V.IMOWEATHER	IMO weather criterion	1.000	2.503	OK
IMOWIND	Heeling angle due to steady wind <16 or <=80% of deck imm.	16.000	15.871 deg	OK
A.AREA.70	ABS MODU Area A+B>1.4(B+C), 70 knot wind	1.400	3.708	OK
GZ0.3	Max GZ > 0.30 m	0.300	1.224 m	OK
RANGE90	Stability range > 90 deg	90.000	100.000 deg	OK
MAXHEEL20_SAILS_BFT7_90	static heeling angle < 20 deg and < deck imm. under sails, wind from 90 deg	20.000	21.361 deg	NOT MET
MAXHEEL20_SAILS_BFT7_60	heeling <20deg under sails, wind from 60deg	20.000	26.028 deg	NOT MET

List of Loads

NAME	LOAD	MASS t	FILL %	XM m	YM m	ZM m	FRSM tm
CONTENTS=Ballast Water (RHO=1.025)							
R2001	BW	37.1	100.0	21.06	0.00	0.75	0.00
R6013	BW	12.0	100.0	55.12	0.00	2.57	0.00
R2013	BW	83.5	100.0	21.06	0.00	2.93	0.00

Napa Oy
NAPA/D/LD/170619
GREENSAILER1/A
GREENSAILER1

LOADING CONDITIONS

DATE 2019-04-25
TIME 12:37
USER DAVE
3

NAME	LOAD	MASS t	FILL %	XM m	YM m	ZM m	FRSM tm
R4013	BW	182.9	100.0	40.70	0.00	3.16	0.00
R3015	BW	63.7	100.0	29.97	0.00	3.55	0.00
R3001	BW	12.3	100.0	32.09	1.61	0.75	0.00
R6001	BW	3.0	100.0	52.23	0.00	0.83	0.00
R5001	BW	7.3	100.0	49.07	0.00	0.76	0.00
R3002	BW	12.3	100.0	32.09	-1.61	0.75	0.00
SUBTOTAL	BW	414.2		33.47	0.00	2.74	0.00

CONTENTS=Diesel Oil (RHO=0.86)

R3011	DO	15.7	74.0	32.10	2.11	1.62	29.57
R3012	DO	15.7	74.0	32.10	-2.11	1.62	0.00
SUBTOTAL	DO	31.5		32.10	0.00	1.62	29.57

CONTENTS=Deadweight Constant (RHO=1)

E-ENGINE	DWC	0.9	0.0	11.50	0.00	1.60	0.00
GENERATOR1	DWC	1.1	0.0	14.00	1.50	1.80	0.00
GENERATOR2	DWC	1.1	0.0	14.00	-1.50	1.80	0.00
GENERATOR3	DWC	1.1	0.0	30.50	2.00	2.80	0.00
GENERATOR4	DWC	1.1	0.0	30.50	-2.00	2.80	0.00
GENERATOR5	DWC	1.0	0.0	57.00	0.00	6.50	0.00
HEATING	DWC	1.0	0.0	33.00	-2.50	2.80	0.00
BOW_THRUSTER	DWC	1.0	0.0	52.50	0.00	1.70	0.00
BATTERY	DWC	1.5	0.0	5.00	-3.00	4.50	0.00
ANCHOR_PS	DWC	1.0	0.0	58.00	3.00	6.00	0.00
ANCHOR_SB	DWC	1.0	0.0	58.00	-3.00	6.00	0.00
CHAIN	DWC	1.5	0.0	51.70	0.00	6.00	0.00
ANCHOR_WINCH	DWC	1.0	0.0	56.50	0.00	9.00	0.00
FITNESS	DWC	1.0	0.0	13.50	-3.00	4.60	0.00
LAUNDRY	DWC	0.6	0.0	4.00	3.00	4.60	0.00
LABORATORY_UNDER_DECK	DWC	1.0	0.0	10.00	3.00	4.60	0.00
CABINS_PS	DWC	1.5	0.0	10.00	3.00	7.00	0.00
CABINS_SB	DWC	1.5	0.0	10.00	-3.00	7.00	0.00
CONFERENCE	DWC	0.5	0.0	0.00	0.00	7.00	0.00
GALLEY	DWC	0.5	0.0	1.50	0.00	9.40	0.00
HOSPITAL	DWC	0.3	0.0	5.50	2.00	9.40	0.00
LIBRARY	DWC	2.0	0.0	9.50	2.00	9.50	0.00
MESS	DWC	0.6	0.0	13.00	0.00	9.40	0.00
BRIDGE	DWC	1.2	0.0	8.00	0.00	12.00	0.00
CONTROL_ROOM	DWC	0.5	0.0	34.00	0.00	3.50	0.00
PAINT_STORE	DWC	0.3	0.0	55.00	0.00	4.40	0.00
PASSENGERS	DWC	1.6	0.0	12.50	0.00	9.40	0.00
SOLID_BALLAST_PS	DWC	20.0	0.0	27.00	4.00	0.70	0.00
SOLID_BALLAST_SB	DWC	20.0	0.0	27.00	-4.00	0.70	0.00
PROPELLER	DWC	2.0	0.0	1.80	0.00	1.80	0.00
ENGINE_EQUIPEMENT	DWC	3.0	0.0	13.00	0.00	1.80	0.00
RUDDER_STEEL	DWC	3.0	0.0	-0.50	0.00	2.00	0.00
MIZZEN_MAST	DWC	10.0	0.0	14.00	0.00	20.30	0.00
MAIN_MAST	DWC	10.0	0.0	30.60	0.00	22.45	0.00
FOCK_MAST	DWC	10.0	0.0	48.50	0.00	22.45	0.00
MIZZEN_BOOM	DWC	1.0	0.0	8.60	0.00	15.20	0.00
MAIN_BOOM	DWC	1.0	0.0	23.25	0.00	12.10	0.00
FOCK_BOOM	DWC	1.0	0.0	40.50	0.00	11.60	0.00
SUBTOTAL	DWC	108.4		25.66	-0.01	8.25	0.00

Napa Oy
 NAPA/D/LD/170619
 GREENSAILER1/A
 GREENSAILER1

LOADING CONDITIONS

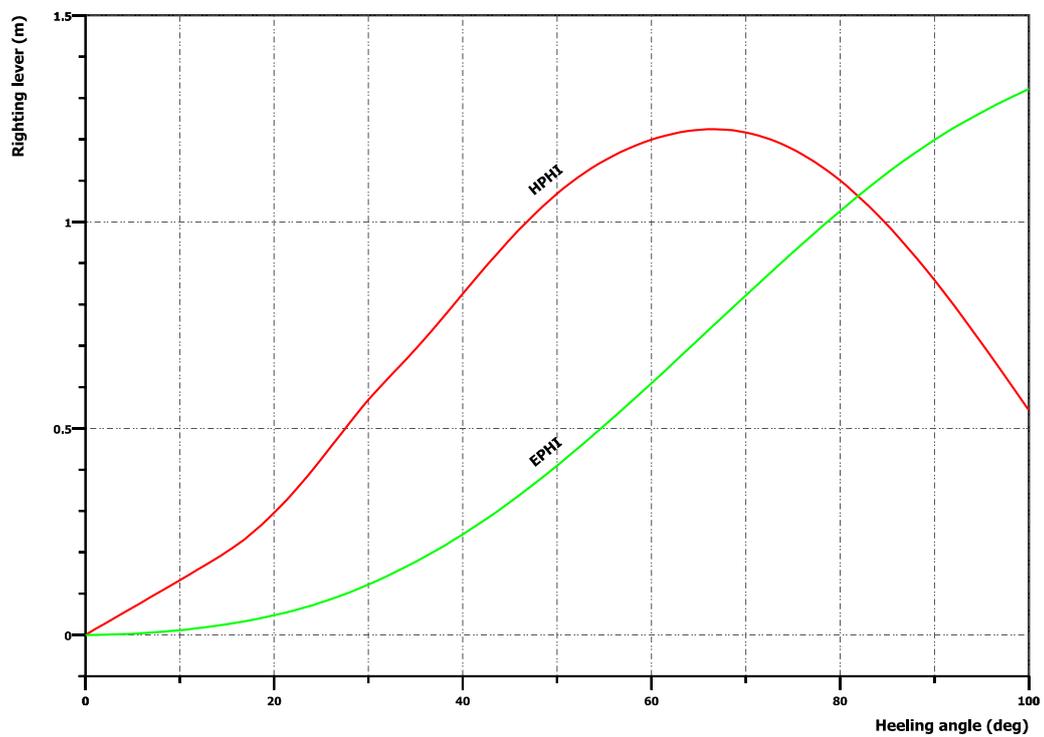
DATE 2019-04-25
 TIME 12:37
 USER DAVE
 4

NAME	LOAD	MASS t	FILL %	XM m	YM m	ZM m	FRSM tm
------	------	-----------	-----------	---------	---------	---------	------------

CONTENTS=Fresh Water (RHO=1)

R5011	FW	45.8	95.0	49.13	0.00	2.36	110.76
TOTAL		599.8		33.18	0.00	3.65	140.33

Stability Curve



HEEL deg	MS m	HPHI m	EPhi mrad	FSMOM tm	DGZ m
0.0	0.000	0.00	0.000	0.0	0.000
1.0	0.001	0.01	0.000	11.2	0.011
2.0	0.001	0.03	0.000	22.3	0.022
3.0	0.001	0.04	0.001	33.5	0.033
4.0	0.001	0.05	0.002	44.7	0.043
5.0	0.001	0.07	0.003	55.9	0.054
10.0	0.004	0.13	0.012	112.7	0.109
15.0	0.014	0.20	0.026	171.3	0.166
20.0	0.030	0.30	0.048	208.8	0.203
25.0	0.064	0.43	0.079	223.8	0.217
30.0	0.107	0.57	0.122	228.7	0.222
35.0	0.129	0.69	0.177	227.9	0.221
40.0	0.163	0.83	0.243	223.1	0.217

Napa Oy
NAPA/D/LD/170619
GREENSAILER1/A
GREENSAILER1

LOADING CONDITIONS

DATE 2019-04-25
TIME 12:37
USER DAVE
5

HEEL deg	MS m	HPIH m	EPHI mrad	FSMOM tm	DGZ m
50.0	0.220	1.07	0.410	205.4	0.199
60.0	0.188	1.20	0.610	179.2	0.174
70.0	0.073	1.22	0.822	146.6	0.142
80.0	-0.141	1.10	1.026	109.0	0.106
90.0	-0.443	0.86	1.199	67.8	0.066
100.0	-0.780	0.54	1.322	24.6	0.024

A.2.4. Leckstabilitätsrechnung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der probabilistischen Leckstabilitätsrechnung aus NAPA in Tabellenform und als Grafik für die verschiedenen Tiefgänge aufgeführt. Rechtlich gesehen ist der Nachweis als Frachtschiff ausreichend, da sich jedoch auch eine große Anzahl an Personen an Bord befinden kann, wurde der Nachweis als Personenschiff ebenfalls erbracht. In Rot sind die wasserdichten Unterteilungen dargestellt. Die Dreiecke in der untersten Ebene geben den Zustand bei Beschädigung einer einzelnen Sektion an. Das Parallelogramm darüber die den Zustand bei Beschädigung der sich darunter befindenden Sektionen usw. Selbst wenn ein Bereich rot ausgefüllt ist, bedeutet dies noch nicht den Untergang wie eine komplette Flutung der betreffenden Sektion gezeigt hat.

passenger case:
 ATTAINED AND REQUIRED SUBDIVISION INDEX

Subdivision length 64.035 m
 Breadth at the load line 11.400 m
 Breadth at the bulkhead deck 11.400 m

Required subdivision index R = 0.67297

Attained subdivision index A = 0.78920

INITDAMTAB	T	GM	SUBD	WCOEF	ASI
	m	m			
DS DAM1	3.900	1.048	ZONES	0.400	0.25673
DS DAM2	3.900	1.048	ZONES	0.400	0.10439
DP DAM1	3.560	0.610	ZONES	0.400	0.25080
DP DAM2	3.560	0.610	ZONES	0.400	0.05106
DL DAM1	3.060	0.600	ZONES	0.200	0.09742
DL DAM2	3.060	0.600	ZONES	0.200	0.02881

DAMAGES W*P*V*S

 1-ZONE DAMAGES 0.60495
 2-ZONE DAMAGES 0.16215
 3-ZONE DAMAGES 0.02211

A-INDEX TOTAL 0.78920

Abbildung A.4.: Leckstabilitätsrechnung für die Segelkonfiguration als Passagierschiff

cargo case:
 ATTAINED AND REQUIRED SUBDIVISION INDEX

Subdivision length 64.035 m
 Breadth at the load line 11.400 m
 Breadth at the bulkhead deck 11.400 m

Required subdivision index R = 0.30576

Attained subdivision index A = 0.90735

INITDAMTAB	T	GM	SUBD	WCOEF	ASI
	m	m			
DS DAM1	3.900	1.048	ZONES	0.400	0.26017
DS DAM2	3.900	1.048	ZONES	0.400	0.12479
DP DAM1	3.560	0.610	ZONES	0.400	0.26017
DP DAM2	3.560	0.610	ZONES	0.400	0.09668
DL DAM1	3.060	0.600	ZONES	0.200	0.13009
DL DAM2	3.060	0.600	ZONES	0.200	0.03544

DAMAGES W*P*V*S

 1-ZONE DAMAGES 0.65043
 2-ZONE DAMAGES 0.23224
 3-ZONE DAMAGES 0.02468

A-INDEX TOTAL 0.90735

Abbildung A.5.: Leckstabilitätsrechnung für die Segelkonfiguration als Frachtschiff

passenger case:

ATTAINED AND REQUIRED SUBDIVISION INDEX

Subdivision length 64.035 m
 Breadth at the load line 11.400 m
 Breadth at the bulkhead deck 11.400 m

Required subdivision index R = 0.67297

Attained subdivision index A = 0.85453

INITDAMTAB	T	GM SUBD	WCOEF	ASI
	m	m		
DS DAM1	3.900	1.018 ZONES	0.400	0.25740
DS DAM2	3.900	1.018 ZONES	0.400	0.10476
DP DAM1	3.500	1.064 ZONES	0.400	0.26017
DP DAM2	3.500	1.064 ZONES	0.400	0.10598
DL DAM1	3.096	0.600 ZONES	0.200	0.09742
DL DAM2	3.096	0.600 ZONES	0.200	0.02879

DAMAGES W*P*V*S

 1-ZONE DAMAGES 0.61499
 2-ZONE DAMAGES 0.20750
 3-ZONE DAMAGES 0.03203

A-INDEX TOTAL 0.85453

Abbildung A.6.: Leckstabilitätsrechnung für die Flettner-Konfiguration als Passagierschiff

cargo case:

ATTAINED AND REQUIRED SUBDIVISION INDEX

Subdivision length 64.035 m
 Breadth at the load line 11.400 m
 Breadth at the bulkhead deck 11.400 m

Required subdivision index R = 0.30576

Attained subdivision index A = 0.93656

INITDAMTAB	T	GM SUBD	WCOEF	ASI
	m	m		
DS DAM1	3.900	1.018 ZONES	0.400	0.26017
DS DAM2	3.900	1.018 ZONES	0.400	0.12457
DP DAM1	3.500	1.064 ZONES	0.400	0.26017
DP DAM2	3.500	1.064 ZONES	0.400	0.12537
DL DAM1	3.096	0.600 ZONES	0.200	0.13009
DL DAM2	3.096	0.600 ZONES	0.200	0.03619

DAMAGES W*P*V*S

 1-ZONE DAMAGES 0.65043
 2-ZONE DAMAGES 0.24986
 3-ZONE DAMAGES 0.03627

A-INDEX TOTAL 0.93656

Abbildung A.7.: Leckstabilitätsrechnung für die Flettner-Konfiguration als Frachtschiff

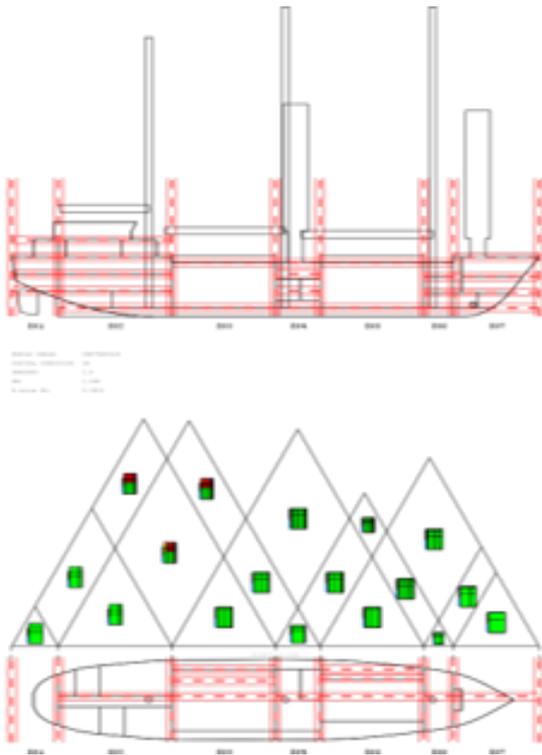


Abbildung A.8.: Leckstabilitätsrechnung, Maximaltiefgang, Segel, Frachtschiff

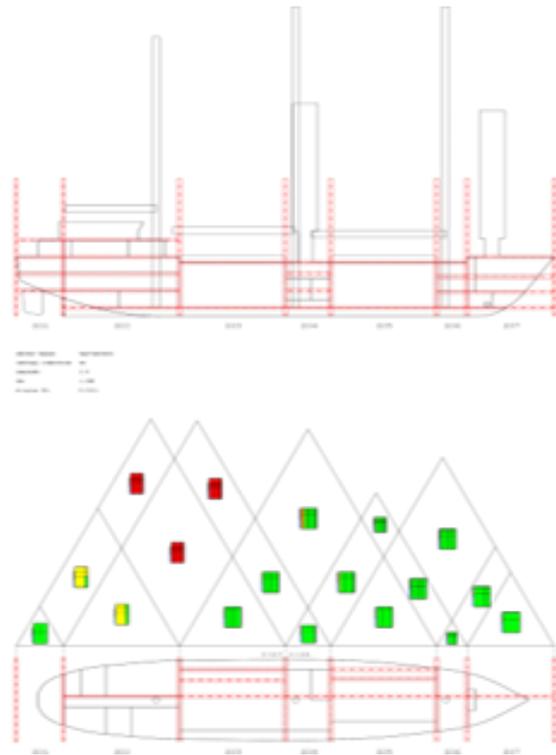


Abbildung A.9.: Leckstabilitätsrechnung, Maximaltiefgang, Segel, Passagierschiff

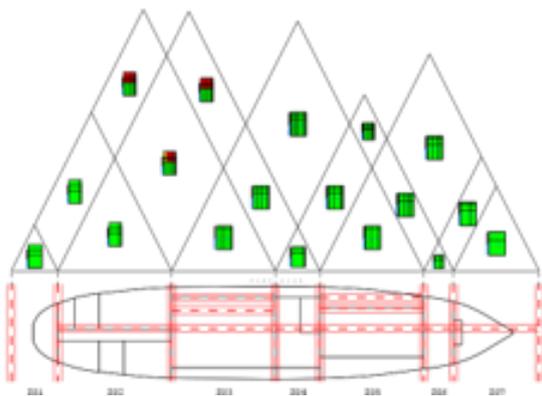


Abbildung A.10.: Leckstabilitätsrechnung, Maximaltiefgang, Flettner, Frachtschiff

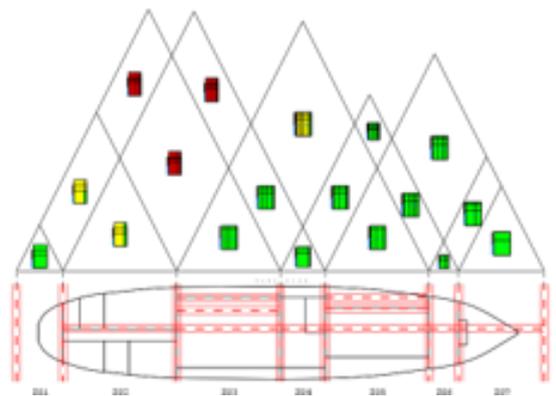


Abbildung A.11.: Leckstabilitätsrechnung, Max.-Tiefgang, Flettner, Passagierschiff

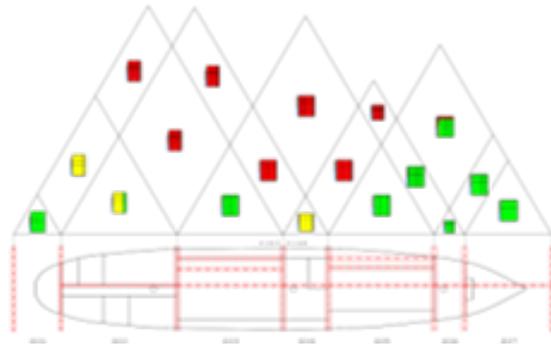
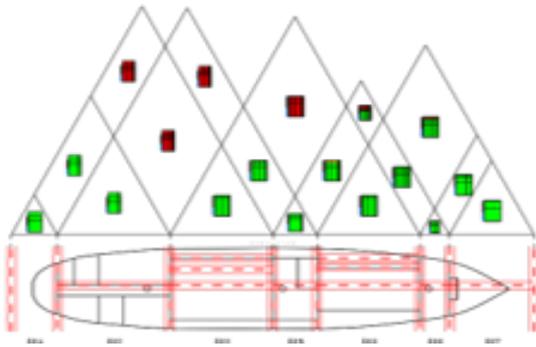


Abbildung A.12.: Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Segel, Frachtschiff

Abbildung A.13.: Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Segel, Passagierschiff

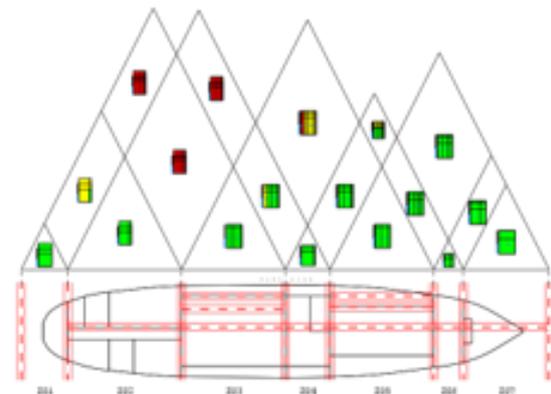
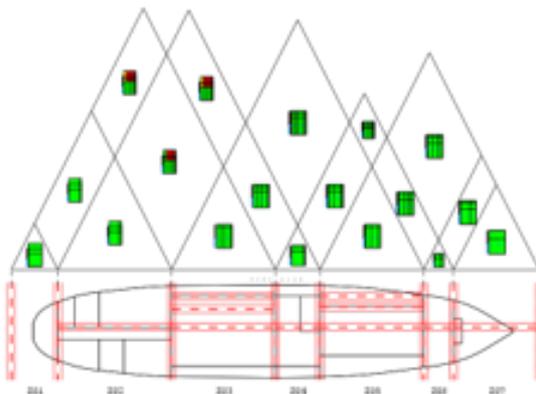


Abbildung A.14.: Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Flettner, Frachtschiff

Abbildung A.15.: Leckstabilitätsrechnung, mittl. Tiefgang, Flettner, Passagierschiff

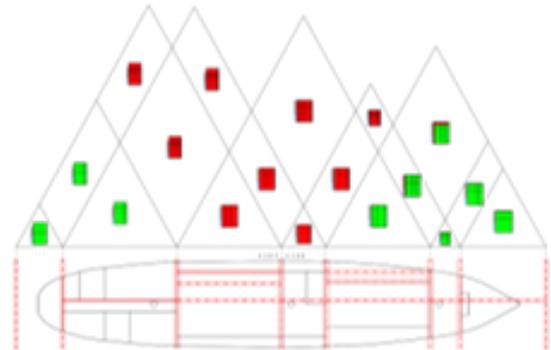
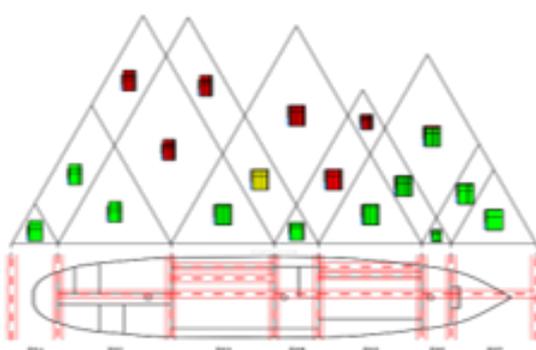


Abbildung A.16.: Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Segel, Frachtschiff

Abbildung A.17.: Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Segel, Passagierschiff

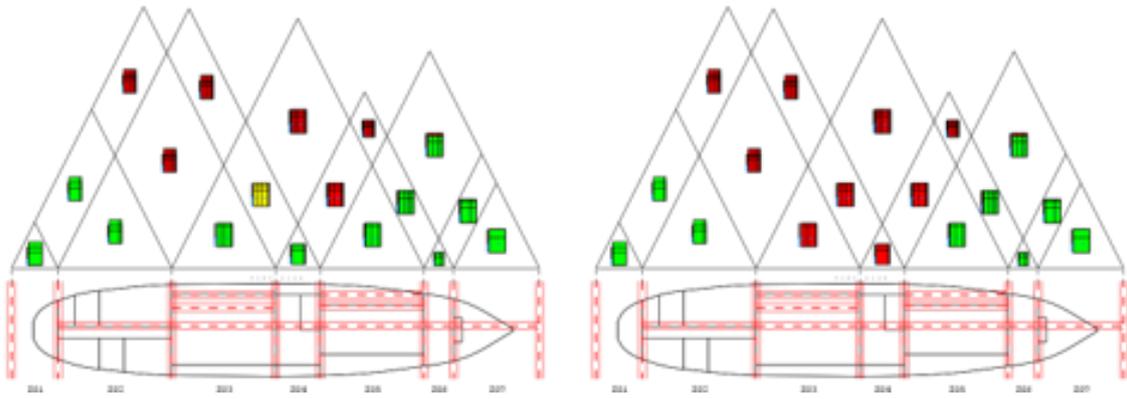


Abbildung A.18.: Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Flettner, Frachtschiff
Abbildung A.19.: Leckstabilitätsrechnung, Ballast, Flettner, Passagierschiff

A.2.5. Freibordrechnung

FREEBOARD CALCULATION

According to INTERNATIONAL CONVENTION on LOAD LINE, Resolution MSC.143 (77)

Freeboard type:	B type
Name of Freeboard Deck:	Deck
L.O.A.	64.075 m
L.B.P.	58.250 m
B. MLD	11.400 m
D. MLD (To Upper Deck)	4.836 m
D. MLD (To Freeboard Deck)	7.600 m
0.85DFM (85% Moulded Depth of Freeboard Deck)	6.460 m
d. Scantling (MLD)	3.900 m
1) Freeboard Length	60.056 m
0.96 L.W.L. at 0.85DFM	59.929 m
Length From Fore Side of Stem to C.L of Rudder Stock at 0.85DFM	60.056 m
2) Freeboard Breadth (B)	12.216 m
3) Freeboard Depth (df)	7.600 m
DFM	7.600 m
Thickness of Deck	0.000 m
Df = DFM + Thickness of Deck =	7.600 m
4) Block Coefficient	0.6309
Moulded Volume at 0.85*D (Vol)	2990.3 m ³
Cb = Vol/(Lf*B*0.85*Dmld) =	0.6309
1) Freeboard Type	B
2) Tabular Freeboard (Tf)	0.574 m
1) Correction for Length below 100 m	0.062 m
Corr. Lf = $7.5 * (100 - Lf) * (0.35 - Le / Lf)$	0.062 m
2) Correction for Block Coefficient	0.000 m
3) Correction for Depth	0.450 m
R = $Lf / 0.48 =$	125.118
(R = Lf/0.48 for L < 120 m and 250 for L > 120 m)	
Corr. Depth = $(D - Lf/15) * R * 0.001 m =$	0.450 m
4) Correction for Position of Deck Line	0.000 m
5) Correction for Recess in Freeboard Deck	0.000 m
6) Correction for Superstructures	-0.065 m
Ratio Le / Lf	0.142
Standard Deduction (Dstd)	0.651 m
Deduction Percentage (Dp)	9.9 %
Corr. Sup. = - Dstd * Dp =	-0.065 m
7) Correction for Sheer	0.210 m
Tabular Freeboard	0.574 m
Correction for Length (Type B, Length <24 >100)	0.062 m
Correction for Cb	0.000 m
Correction for Depth	0.450 m
Correction for Deck Line	0.000 m
Correction for Recess in Freeboard Deck	0.000 m
Correction for Superstructures and Trunks	-0.065 m
Correction for Sheer	0.210 m

Summer Freeboard	1.232 m
Maximum draught at summer freeboard	6.368 m
Tropical Freeboard	1.099 m
Winter Freeboard	1.364 m
Winter North Atlantic Freeboard	1.414 m
Fresh Water Freeboard	1.120 m
Tropical Fresh Water Freeboard	0.987 m
Assigned Summer Freeboard	3.700 m
Draught at Summer Freeboard	3.900 m
Assigned Tropical Freeboard	3.619 m
Assigned Winter Freeboard	3.781 m
Assigned Winter North Atlantic Freeboard	3.831 m
Assigned Fresh Water Freeboard	3.635 m
Assigned Tropical Fresh Water Freeboard	3.553 m

Minimum Bowheight & Reserve Buoyancy (with deck plate thickness 5 mm at FP (changing this value has little influence)):

Reg 39.1 Required bow height 3.216 m

$$Fb = (6075(L/100) - 1875(L/100)^2 + 200(L/100)^3) * (2.08 + 0.609 * Cb - 1.603 * Cwf - 0.0129 * (L/d1))$$

Where:

Fb = Calculated minimum bow height

L = Freeboard Length

B = Moulded Breadth

d1 = Draught at 85% of D

Cb = Block Coefficient

Cwf = Waterplane Area Coefficient Fwd of L/2

Awf = Waterplane Area Fwd of L/2

$$Fb = (6075(60.056/100) - 1875(60.056/100)^2 + 200(60.056/100)^3) * (2.08 + 0.609 * 0.631 - 1.603 * 0.797 - 0.0129 * (60.056 / 6.460)) = 3.216 \text{ m}$$

Reg 39.2 Actual Bow Height

Calculation done according to Reg. 39(2). Forecastle with height ≥ 0.5 * standard height, sheer of forecastle taken into account.

Sheer of deck extends over FP-0.15*L, sheer taken into account

$$Ha = D + \text{Deck Plate Thickness} + \text{Sheer at FP} + \text{Height of F'cle at FP} - \text{Proposed Summer Draught} = 7.600 \text{ m} + 0.005 \text{ m} + 0.000 \text{ m} + 1.759 \text{ m} - 3.900 \text{ m} = 5.464 \text{ m}$$

Rule Compliance Satisfied

Reg 39.5

The attained area is the area limited by the following coordinates:

Xmin:	51.05	(FP-0.15*FP)
Xmax:	60.06	(FP)
Zmin:	3.90	(Summer Draught)
Zmax:	Upper limit of arrangement	

These coordinates limit the maximum projected area as defined by the rule (Reg. 39(5)). The summer draft is a user input value.

$$\text{Required area} = (0.15 * F_{min} + 4 * (L/3 + 10)) * L / 1000 \text{ m}^2$$

$$F_{min} = (f_0 * f_1) + f_2$$

f0 is the tabular freeboard corrected for Reg 27.9 and 27.10 as applicable

f1 is the correction for block coefficient, see reg 30

f2 is the correction for depth, in mm

Required area:	16.434 m ²
Attained area:	38.212 m ²

Rule compliance: Satisfied

Abbildung A.21.: Fortsetzung der Freibordrechnung

A.3. Schiffskonstruktion

A.3.1. FEM-Modellierung in Poseidon/GLFrame

Es stellt sich die Frage, wie sich in zweckmäßiger Art und Weise die Lasten von Masten oder Flettner-Fundamenten in einem Poseidonmodell darstellen lassen.

Da die ersten Versuche durch die Aufbringung der Lasten entlang sogenannter Funktionaler Elemente oder direkt an einzelnen Knoten noch nicht überzeugen konnten, sollte die Rechnung des Programmpakets an einem einfachen Testbeispiel nachvollzogen und validiert werden.

Beschreibung

Nachgebildet wird in einem neuen Poseidon-Modell zunächst eine einfache Deckstruktur. Dies bietet den Vorteil, dass das Problem auch als 2D-Fall behandelt und damit als einfache Trägerrostrechnung per Hand oder mit anderen Programmen schnell nachgeprüft werden kann.

Hierzu wurde das Deck wie in Abbildung A.22 gezeigt in Originalbreite mit den längslaufenden Hollandprofilen sowie transversalen Unterzügen im Abstand von drei Bauspanten modelliert.

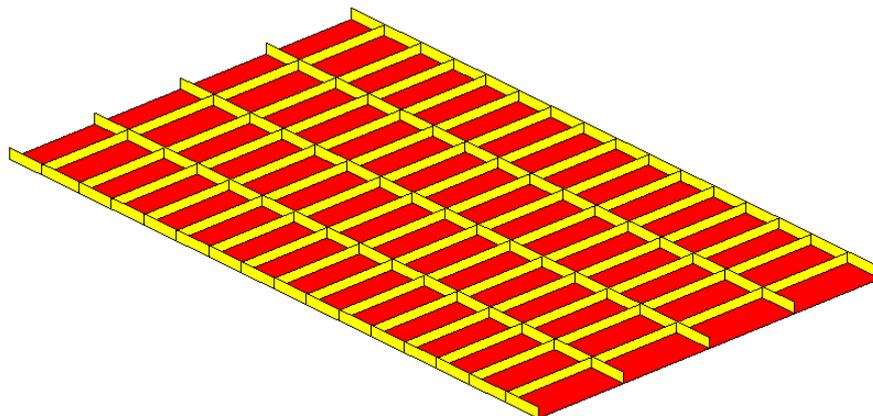


Abbildung A.22.: Decksmodell

Für die einzelnen Komponenten des Modells wurden die Abmessungen und Abstände entsprechend der Tabelle A.2 verwendet:

Tabelle A.2.: Modellierung

Bauteil	Dimensionierung
Deck	15 mm
Holland-Profil	HP 180 x 9 mit a = 750 mm
Unterzüge	T-Profil 200 x 10,0 x 100 x 8,0 mit 3a Abstand

Randbedingungen

Gelöst wurde das komplette Modell ohne die Ausnutzung von Symmetrie-Randbedingungen. Aufgebracht in Registerkarte 7.3 wurden die Randbedingungen anhand des implementierten Assistenten, da dieser die Randbedingungen nach Klasse vorsieht.

Modellierung via Functional Element Loads

Es wurden in Registerreiter 7.4.5. Lasten auf Funktionale Elemente entsprechend der Abbildung A.23 aufgebracht. Hierbei ist insbesondere auf die Wahl der korrekten Koordinaten-Richtung zu achten, als auch auf die Korrekten Vorzeichen der Lasten (dem globalen Schiffskoordinatensystem folgend).

Func.Ele.	Location of Load			Load [kN/m ²]	
	X-Start	Y-Z Start	Sym.	X-start,Y-Z-start	X-end,Y-Z-start
	X-End	Y-Z End	Dir	X-start,Y-Z-end	X-end,Y-Z-end
DK	3	Y=0,0	P+S	-50,0	-50,0
	9	Y=3000,0	3	-50,0	-50,0

Abbildung A.23.: Lasten über Funktionale Elemente

Hierbei ist zu beachten, dass an den Grenzen des Definitionsgebietes entsprechend reduzierte Werte für die Flächenlast eingebracht werden wie in Abbildung A.24 gezeigt.

Modellierung via Kranfundament

Wird als Schiffstyp DryCargo/MPV gewählt, so steht (nach Speicherung der Datei) in Register 7.4.5 ein Kransymbol zur Erzeugung von Kräften und Momenten auf Funktionalen Elementen zur Verfügung. Dabei werden hier auch nur drei Einträge in z-Richtung erzeugt - das Moment also durch ein Kräftepaar ersetzt - wobei sich die Grenzen der Einbringung an der des Funktionalen Elements richten. Der erste Eintrag steht hierbei für die vertikale Kraft. Es muss daher ein eigenes, abgegrenztes Funktionales Element für die Fundamentfläche erzeugt werden, da ansonsten keine korrekten Punktlasten erzeugt werden, sondern die Lasten über einen zu großen Bereich verteilt werden.

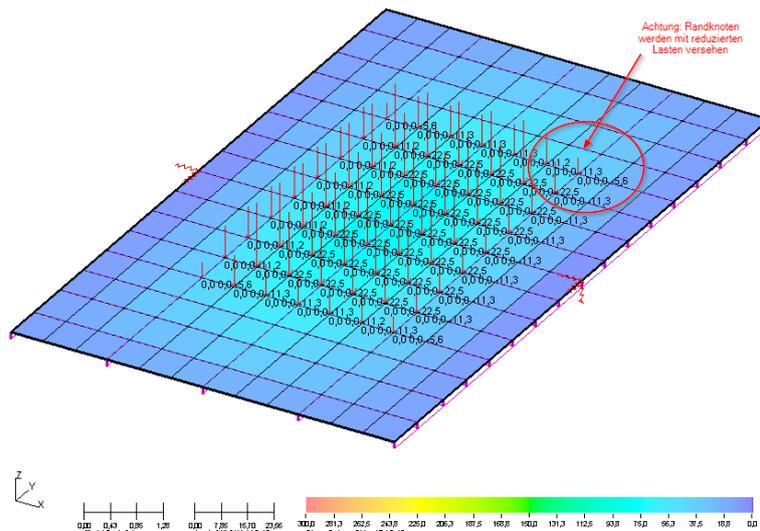


Abbildung A.24.: Lasten und resultierende Spannungsverläufe

Modellierung via Nodal Loads

Eine weitere Möglichkeit, Lasten aufzubringen, besteht in der direkten Definition der Kräfte und Momente im Programm GLFrame unter der Registerkarte 4.1 Nodal Loads. Nachteilig ist hierbei allerdings, dass zunächst die Bezeichnungen der relevanten Knoten zu ermitteln sind. Dies braucht für jedes erzeugte Gitter nur einmal zu erfolgen, muss allerdings bei geänderter Vernetzung erneut erfolgen bzw. geprüft werden. Ferner müssen die Lasten für jeden Knoten in jeder relevanten Loadgroup erzeugt werden - hierdurch vervielfacht sich die Anzahl der Einträge recht schnell. Dies könnte zwar mit selbsterstellten Skripten automatisiert werden, insgesamt ist dies aber eine ernstzunehmende Fehlerquelle. Vorteilhaft ist, dass direkt die Kräfte und Momente aufgebracht werden können.

Problem: Beim Aufbringen sehr großer Kräfte können sich beliebige Verformungen (größer als das berechnete Bauteil) ergeben. Gleichzeitig sind die angezeigten Spannungen sehr niedrig.

Modellierung via Flächenlasten

Eine Kraft aufgebracht zwischen zwei Spanten und jeweils 600 mm a. MS. ergibt eine Kraft von 141 kN. Werden in GLFrame die Knotenkräfte ausgelesen, so ergibt sich in der Summe der Knotenkräfte nur eine Kraft von 94,3 kN. Eine Analyse ergibt allerdings, dass durch die Vernetzung die entsprechenden Knoten nicht exakt die Fläche mit der aufgetragenen Flächenlast repräsentieren. Durch die 400 mm a. MS. liegenden Knoten wird eine 66 %ige Fläche gebildet und somit liegt auch die Gesamtkraft um den gleichen Betrag kleiner. Damit werden zwar Flächenlasten kon-

form abgebildet, allerdings werden dadurch die Erstreckung des Lasteintrages und dessen absoluter Wert verfälscht. Zudem sind die Ergebnisse dadurch auch noch stark abhängig von der Gestaltung des Rechengitters, namentlich dem Knotenabstand. Für größere Belastungen, z.B. Drücke auf Platten, mag dieser Unterschied relativ gering sein, gerade der Eintrag von Punktlasten (Abspannungen, Verstägung, Masten), lässt sich auf diese Art nicht zufriedenstellend auflösen. Die zugehörigen Spannungen fallen dagegen noch geringer aus.

Schlussfolgerung

Die Randbedingungen scheinen grundsätzlich geeignet und plausibel. Die Art der Modellierung von Platten und Steifen ist ebenfalls eine geeignete Form der Modellierung. Die ausgegebenen Resultate sind allerdings nicht direkt sprechend, da die Spannungen vor allem auf die Platten-Elemente bezogen und dargestellt werden. Die Abtragung innerhalb der unterstützenden Bauteile wird somit nicht direkt gezeigt.

A.3.2. Bauspantenraster

Die folgende Tabelle A.3 gibt die Position der Bauspanten in Millimetern ab dem Ursprung des schiffsfesten Koordinatensystems an (Ursprung bei der Basis des hinteren Lotes). Fett gekennzeichnete Spanten markieren die Position von wasserdichten Schotten als wesentliche Konstruktionsmerkmale.

Tabelle A.3.: Bauspantenraster

Spant	Pos.	Spant	Pos.	Spant	Pos.	Spant	Pos.
-4,5	-2700						
-4	-2400						
-3	-1800						
-2	-1200						
-1	-600						
0	0	30	18000	60	36000	90	54000
1	600	31	18600	61	36600	91	54600
2	1200	32	19200	62	37200	92	55200
3	1800	33	19800	63	37800	93	55800
4	2400	34	20400	64	38400	94	56400
5	3000	35	21000	65	39000	95	57000
6	3600	36	21600	66	39600	96	57600
7	4200	37	22200	67	40200	97	58200
8	4800	38	22800	68	40800	98	58800
9	5400	39	23400	69	41400	99	59400
10	6000	40	24000	70	42000	100	60000
11	6600	41	24600	71	42600	101	60600
12	7200	42	25200	72	43200	102	61200
13	7800	43	25800	73	43800	103	61800
14	8400	44	26400	74	44400	104	62400
15	9000	45	27000	75	45000		
16	9600	46	27600	76	45600		
17	10200	47	28200	77	46200		
18	10800	48	28800	78	46800		
19	11400	49	29400	79	47400		
20	12000	50	30000	80	48000		
21	12600	51	30600	81	48600		
22	13200	52	31200	82	49200		
23	13800	53	31800	83	49800		
24	14400	54	32400	84	50400		
25	15000	55	33000	85	51000		
26	15600	56	33600	86	51600		
27	16200	57	34200	87	52200		
28	16800	58	34800	88	52800		
29	17400	59	35400	89	53400		

A.4. Windantriebstechnik

A.4.1. Berechnung des Segelflächenschwerpunkts

Für eine weitgehend automatische Berechnung des Flächenschwerpunkts eines Segels wurde eine Methode entwickelt, welche nur wenige Hauptparameter des Segels als Eingangsgröße braucht. Ein dreieckiges Hochsegel ohne große Wölbung zum Segelkopf hin kann nach Abbildung A.25 wie folgt berechnet werden:

Gegeben: Höhe bzw. Vorliedlänge a , Länge bzw. Unterliedlänge b , Neigungswinkel Θ des Baumes.

Der Winkel φ des Segelhalses ist demnach

$$\delta = 90 - \Theta \quad (\text{A.1})$$

Die Länge c des Achterlieks ist

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos\varphi} \quad (\text{A.2})$$

Der Winkel α des Schothorns ist

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2ab}\right) \quad (\text{A.3})$$

Der Winkel β ist

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (\text{A.4})$$

Die halbe Länge des Achterlieks ist

$$d = c/2 \quad (\text{A.5})$$

Das Lot aufs Achterliek ist

$$h = b \cdot \cos\beta \quad (\text{A.6})$$

Für die Seitenhalbierende e gilt

$$e = \sqrt{b^2 + d^2 - 2bd \cdot \cos\alpha} \quad (\text{A.7})$$

Hieran befindet sich der Winkel

$$\gamma = \arccos\left(\frac{b^2 - d^2 - e^2}{-2de}\right) \quad (\text{A.8})$$

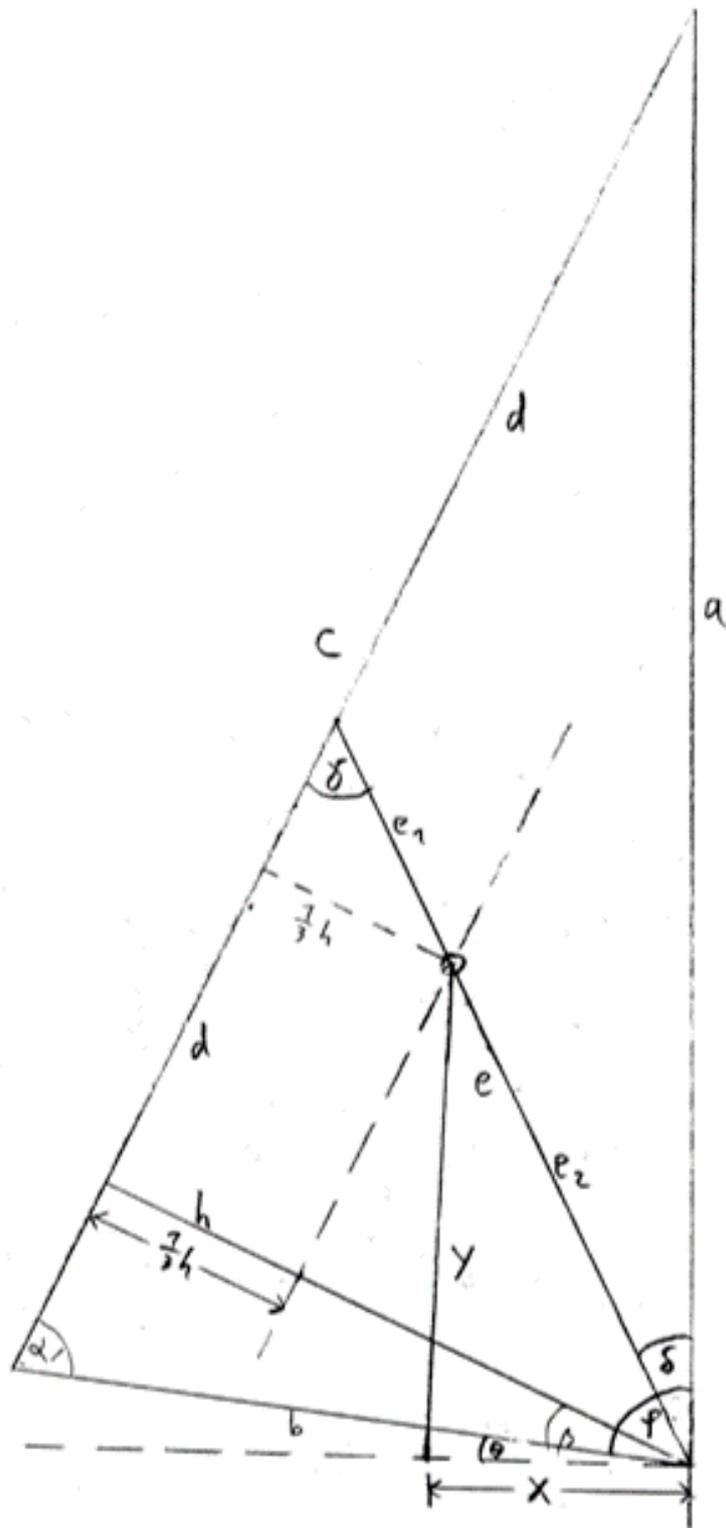


Abbildung A.25.: Der Flächenschwerpunkt eines Hochsegels liegt bei $\frac{1}{3} h$ auf der Seitenhalbierenden e .

Die Seitenhalbierende e lässt sich aufteilen in

$$e_1 = \frac{1/3h}{\sin\gamma} \quad (\text{A.9})$$

$$e_2 = e - e_1 \quad (\text{A.10})$$

Letztendlich ergibt sich der vertikale Abstand y des Flächenschwerpunkts zu

$$y = e_2 \cdot \sin(\varphi + \Theta - \beta) \quad (\text{A.11})$$

Der horizontale Abstand x des Flächenschwerpunkts zum Mast hin ist

$$x = \sqrt{e_2^2 - y^2} \quad (\text{A.12})$$

Nun müssen diese Abstände nur noch auf das für die Kräfte verwendete Koordinatensystem bezogen werden, indem man z.B. die Mastposition vom AP und den Segelursprung vom Kiel aus angibt. Für die Flächenmomente teilt man die Segelfläche durch die Lage des Segeldruckpunkts im Koordinatensystem. Die Fläche A des Segels beträgt

$$A = c \cdot h/2 \quad (\text{A.13})$$

Ein Stagesegel allgemein kann nach Abbildung A.26 berechnet werden.

Gegeben: Unterlieklänge a , Vorlieklänge b , Neigungswinkel β , Segelhalswinkel α .

Die Länge des Achterlieks b berechnet sich zu

$$b = \sqrt{a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos\alpha} \quad (\text{A.14})$$

Die halbe Länge des Vorlieks c ist

$$d = c/2 \quad (\text{A.15})$$

Die Seitenhalbierende e ist

$$e = \sqrt{a^2 + d^2 - 2ad \cdot \cos\alpha} \quad (\text{A.16})$$

Hieran befindet sich der Winkel

$$\delta = a \cos \left(\frac{a^2 - e^2 - d^2}{-2ed} \right) \quad (\text{A.17})$$

Das Lot h aufs Vorliek d ist

$$h = a \cdot \sin\alpha \quad (\text{A.18})$$

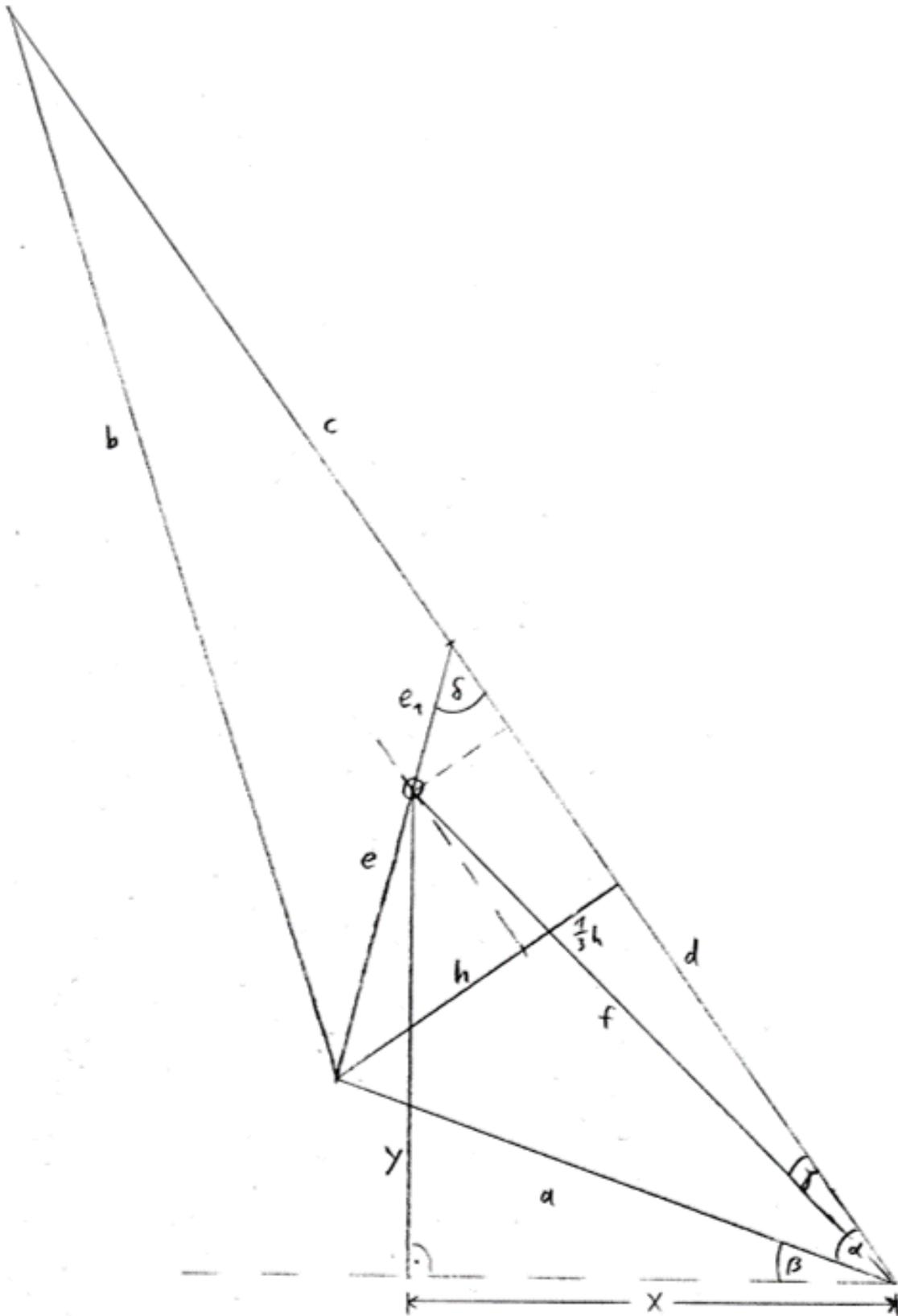


Abbildung A.26.: Berechnung des Flächenschwerpunkts an einem Stagsegel.

Ein Teil der Seitenhalbierende e ist

$$e_1 = \frac{1/3h}{\sin\delta} \quad (\text{A.19})$$

Daraus lässt sich die Länge f berechnen:

$$f = \sqrt{e_1^2 + d^2 - 2e_1d \cdot \cos\delta} \quad (\text{A.20})$$

Der daran befindliche Winkel ist

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{e_1 \cdot \sin\delta}{f}\right) \quad (\text{A.21})$$

Der horizontale Abstand x des Flächenschwerpunkts zum Befestigungspunkt des Segelhalses hin ist

$$x = f \cdot \cos(\alpha + \beta - \gamma) \quad (\text{A.22})$$

Der vertikale Abstand y des Flächenschwerpunkts zum Befestigungspunkt des Segelhalses hin ist

$$y = \sqrt{f^2 - x^2} \quad (\text{A.23})$$

Für die Berechnung der Segelfläche gilt Formel A.13.

Die Berechnung des Flächenschwerpunkts für ein Stagesegel gilt für alle Vorsegel ebenso wie für das untere Dreieck des Gaffelsegels und das obere Dreieck, wenn es gedreht wird.

Einfacher geht es, wenn man die Eckpunkte des Dreiecks vektoriell addiert und durch drei teilt.

A.4.2. Polardiagramm Schiffsgeschwindigkeiten

Abbildung A.27 zeigt ein Polardiagramm mit der zu erwartenden Schiffsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung von Drift und Ruderlegen bei drei verschiedenen Windstärken für ein Hochsegelrigg, zwei große und zwei kleine Flettner-Rotoren.

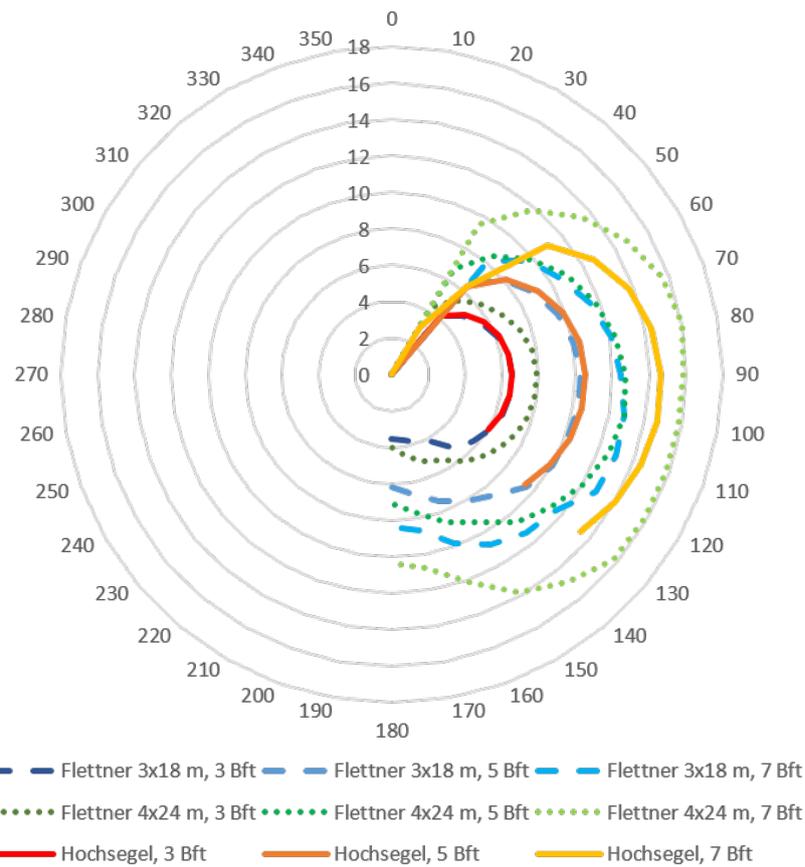


Abbildung A.27.: Erreichbare Schiffsgeschwindigkeit in kn mit einem Hochsegel-Rigg oder Flettner-Rotoren

A.4.3. CFD-Gitter

In Tabelle A.4 sind die Eigenschaften des Gitters zur Untersuchung der Hochsegel aufgelistet.

Tabelle A.4.: Eigenschaften des CFD-Gitters (Heldens u. a., 2018)

	blockMesh	refined mesh
type of modeling volume	cylindrical	cylindrical
diameter of modeling volume	200 m	200 m
height of modeling volume	100 m	100 m
grid cells	595 000	6 792 155
grid nodes	614 091	7 366 116
biggest av. grid size	1.5 m	1.5 m
smallest av. grid size	1.5 m	0.05 m
layer next to wall	-	-
minimum volume	2.97 m ³	8.26·10 ⁻⁶ m ³
maximum volume	7.01 m ³	7.35 m ³