

INNOVEN GmbH, Bremerhaven

**Prototypenentwicklung
für eine
innovative Segelmaschine**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32795/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Rolf Rohden

Bremerhaven, September 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32795/01	Referat	24/0	Fördersumme	120.000 Euro
----	-----------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel Prototypenentwicklung für eine innovative Segelmaschine

Stichworte Segelmaschine, aktives Profil, Flettner-Rotor

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	01.10.2016	31.03.2018	
Zwischenberichte	31.12.2016	30.06.2017	31.12.2017

Bewilligungsempfänger	INNOVEN GmbH	Tel	0471/95845090
	Westkai 34	Fax	0471/95845099
	27572 Bremerhaven	Projektleitung	
		Dipl.-Ing. Rolf Rohden	
		Bearbeiter	
		Dipl.-Phys. Martina Kuhlmann	

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die INNOVEN GmbH entwickelt einen innovativen Segelantrieb als Hilfe zur Brennstoffeinsparung für die kommerzielle Schifffahrt. Das Projekt hat drei Phasen. In den Jahren 2012 bis 2013 wurde die erste Phase im Rahmen des DBU Projektes 29668 mit dem Titel: „Grundlagenuntersuchung zur Optimierung von Segelrotoren (Flettner-Rotoren) für den Antrieb von Schiffen“ erfolgreich bearbeitet.

Die Ergebnisse waren sehr ermutigend und zeigen, dass eine solche Segelmaschine noch deutlich mehr Brennstoffeinsparpotential birgt, als der klassische Flettner-Rotor (ca. 30 % mehr).

Um die Machbarkeit dieser Technologie aus technischer und wirtschaftlicher Sicht einzuschätzen, ist es erforderlich, für einen Rotor in realer Größe die Konstruktion so weit voranzubringen, dass es möglich ist, die Kosten für den Bau eines solchen Systems abzuschätzen. Auch müssen neu entwickelte Komponenten für die Schifffahrt von einer Klassifikationsgesellschaft zertifiziert werden, was in der Regel am sinnvollsten auf einem Teststand durchgeführt wird.

Der nächste Schritt ist somit die Umsetzung der in der ersten Projektphase erzielten Ergebnisse in eine konkrete Entwicklung für einen Prototyp (Phase 2, vorliegendes Projekt).

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt war in vier Arbeitspakete unterteilt:

AP 1 Durchführung Pre-Design und Lastenberechnung für Komponentenauslegung

Zunächst wurde eine Design Basis mit technischen Daten erstellt (Hauptabmessungen). Hierbei wurden die Rahmenparameter einer möglichen späteren Produktpalette in Bezug auf Höhe, Durchmesser, Materialien, etc. festgelegt. Basierend auf den Ergebnissen wurde das Rotorkonzept (z.B. Lagerung, Schmierung und Kühlung, Antriebskonzept, Materialien etc.) erstellt.

Auch wurde ein vorläufiges Design der Hauptkomponenten (Rotorhülle, Profil, Endscheibe, Lagerung) angefertigt (3D-CAD mit Autodesk Inventor). Mit diesem vorläufigen Design und den Geometrien konnten anschließend die Berechnung der dimensionierenden Lasten für die Komponentenentwicklung nach den Richtlinien der Klassifikationsgesellschaft GL/DNV bzw. Lloyds Register durchgeführt werden. Hierbei wurden Seegangs- und externe Lasten (Wind) sowie Betriebslasten zu ermittelt.

AP 2 Konstruktion eines Prototyps

Mit den Ergebnissen aus AP 1 wurde nun die reale Konstruktion des Prototyps am 3D-CAD durchgeführt (Autodesk Inventor). Die Dimensionierung der Bauteile wurde hierbei mit den Lastannahmen aus AP 1 vorgenommen. Nach Abschluss der Detailkonstruktion im 3D-CAD wurden für die Einzelteile 2D-Fertigungszeichnungen mit Toleranzen etc. abgeleitet und Stücklisten erstellt.

Für die tragenden Hauptkomponenten wurden zudem Finite Elemente Berechnungen zur Bauteiloptimierung und zur Vorbereitung des Zertifizierungsprozesses durchgeführt.

Nach dem Abschluss von AP 2 sind alle Voraussetzungen geschaffen, einen Prototyp der Segelmaschine in realer Größe herzustellen, und die Kosten dafür zu ermitteln.

AP 3 Planung eines landgestützten Teststandes und Definition der Testprozedur für den Prototyp

Eine Optimierung der Segelmaschine hinsichtlich des Betriebsverhaltens und der Software-Entwicklung für die Automation ist an Land auf einem Teststand wesentlich einfacher und kosteneffektiver als auf einem seegehenden Schiff.

Zudem müssen vor dem Einsatz auf einem Schiff die Funktionsfähigkeit und Sicherheitseinrichtungen im Rahmen der Zertifizierung bei einer Klassifikationsgesellschaft nachgewiesen werden, was ebenfalls idealerweise auf einem Teststand erfolgt.

Die Teststandsauslegung entfiel, da bereits im Rahmen von AP2 eine Fundamentsektion für die Segelmaschine konstruiert wurde, die sowohl später auf dem Schiff als auch schon vorab als Teststandsfundament verwendet werden kann.

In AP3 wurden die wesentlichen durchzuführenden Testprozeduren und die hierfür erforderliche Meßstellen/-arten definiert.

AP 4 Ermittlung der Kosten für eine Segelmaschine (Prototyp und Abschätzung Serie) sowie Darstellung der Wirtschaftlichkeit eines solchen Antriebssystems

Mit Hilfe der in den vorangegangenen Arbeitspaketen erarbeiteten Konstruktionszeichnungen wurde eine detaillierte Kostenermittlung durchgeführt, um die Kosten für einen Prototyp möglichst genau planen zu können.

Daraufhin erfolgte ein Ausblick auf eine mögliche Serienfertigung und die damit erzielbare Kostenreduktion. Hiermit wiederum wurde die Wirtschaftlichkeit des Systems im Schiffsbetrieb dargestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Mit Hilfe der im Rahmen des vorliegenden Projektes erstellten Konstruktionsdaten wurde erstmalig eine wirtschaftliche Bewertung für den Bau und den Einsatz einer Segelmaschine vom Typ WD 100 ermöglicht. Ebenfalls wurden damit die Grundlagen für die Errichtung eines Prototyps geschaffen.

Damit wurden die Projektziele vollumfänglich erreicht.

Die Brennstoffeinsparung durch den Einsatz der Segelmaschine ist naturgemäß stark von der von dem jeweiligen Schiff befahrenen Fahrtroute abhängig. Auch die Anzahl der Segelmaschinen an Bord muss je nach Platzangebot und technischer Ausrüstung (Ruderanlage, Anzahl Antriebsmaschinen etc.) entsprechend geplant werden. So kann die optimale Konfiguration für das jeweilige Schiff definiert werden. Wirtschaftlich sinnvoll ist die Nutzung von Segelmaschinen hauptsächlich auf längeren Fahrtrouten, da hier das Einsparpotential aufgrund einer besseren Windverteilung größer ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass es wirtschaftlich und technisch sinnvoll ist, Segelmaschinen dieses Typs auf Frachtschiffen einzusetzen, anstatt in teure Technologien wie LNG oder Scrubber zu investieren, um die geforderte Einhaltung der Emissionsgrenzwerte zu erreichen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

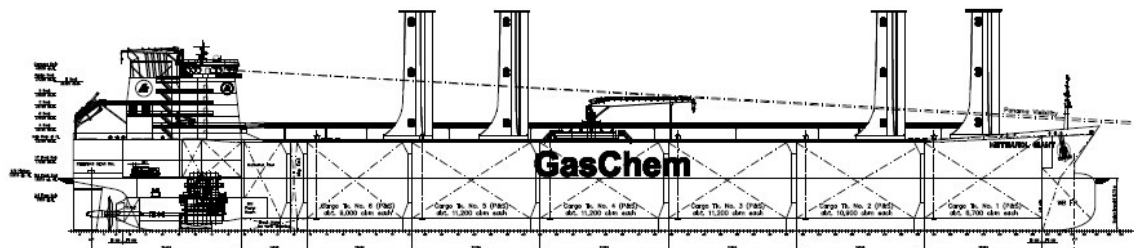
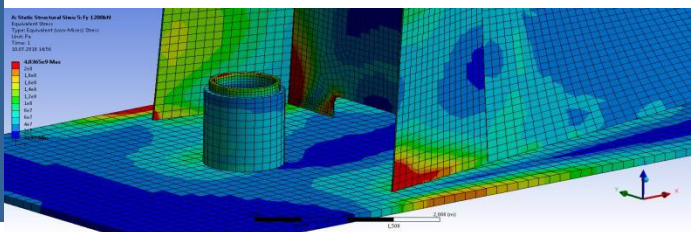
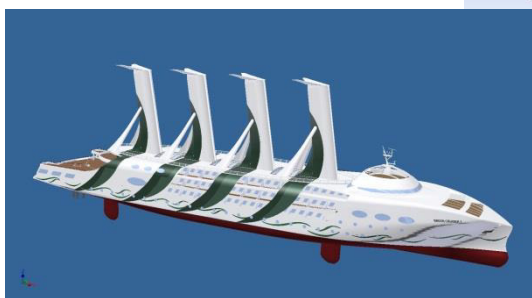
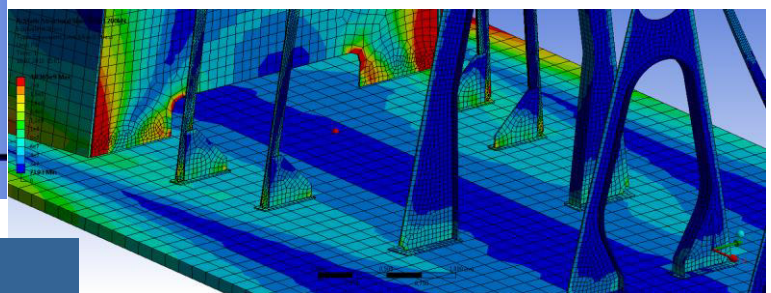
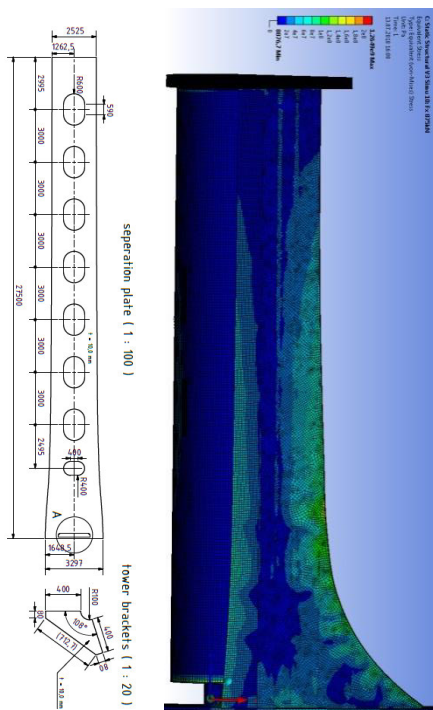
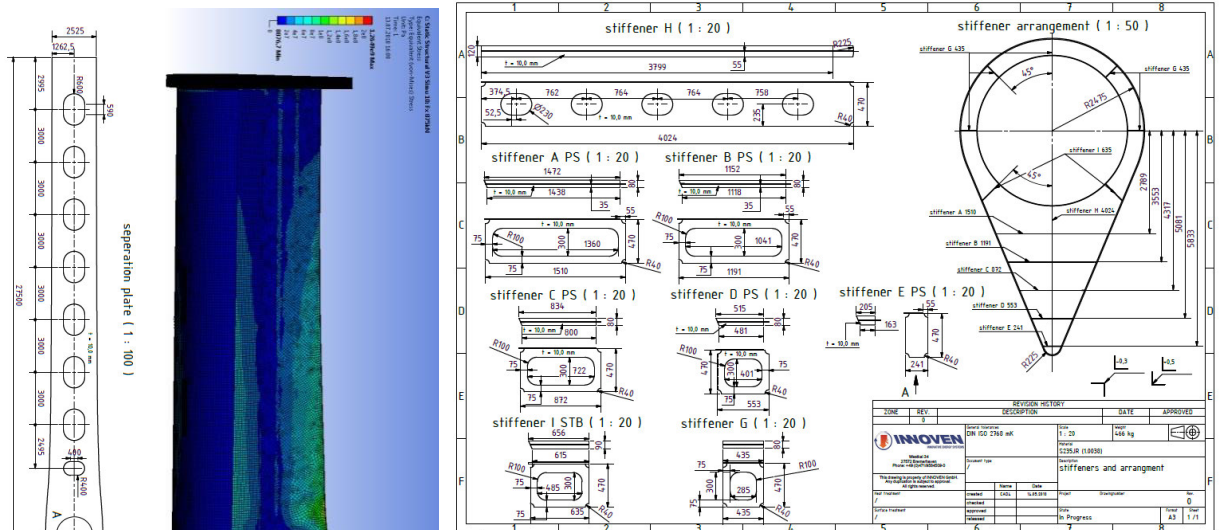
- Die Entwicklungsergebnisse wurden/werden verschiedenen Reedereien vorgestellt.
- Es ist geplant, die Ergebnisse auf einer Tagung der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG) im Rahmen eines Vortrags zu präsentieren.
- Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird dem Maritimen Koordinator der Bundesregierung als Hintergrundinformation zur Verfügung gestellt.

Fazit

- Nachhaltigkeit und Luftreinhaltung bestimmen schon jetzt einen Großteil der Richtlinien für die Schifffahrt und werden die bestimmenden Themen für die nächsten Jahre bleiben.
- Die Segelmaschinenteknologie liefert eine ideale technische Lösung zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs, die auch den Anforderungen an eine robuste und wartungsarme Ausführung von Bordequipment gerecht wird.
- Der Zeitpunkt für die Anwendung der Technologie ist der richtige, es muss jetzt die Information an die richtigen Stellen verbreitet werden.

Abschlußbericht zum DBU Projekt 32795/01

„Prototyp-Entwicklung für eine innovative Segelmaschine“



INHALT

1. Zusammenfassung	5
2. Einleitung.....	5
3. Aufgabenstellung nach Arbeitspaketen.....	7
4. Hauptteil entsprechend der Arbeitspakete	8
4.1. Design Basis.....	8
4.2. Pre-Design & Hauptabmessungen WD 112.....	9
4.3. Erstellung der Lastannahmen	10
4.4. 3D CAD Konstruktion & Rotor-Lagerung.....	14
4.5. Ergebnisse FEM Analysen.....	22
4.6. Fertigungszeichnungen und Stücklisten.....	25
5. Planung Prototyp-Teststand.....	28
6. Kosten Ermittlung / Wirtschaftlichkeit	31
7. Fazit.....	34

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abb. 1: Seitenansicht WD 100	9
Abb. 2: Ansicht schräg von vorne	10
Abb. 3: verwendete Richtlinien zur Ermittlung der Extremlasten	11
Abb. 4: Berechnung der Extremlasten/-momente.....	12
Abb. 5: verwendete Richtlinien zur Ermittlung der dynamischen Betriebslasten.....	13
Abb. 6: Berechnung der Betriebslasten/-momente.....	13
Abb. 7: Details zur Konstruktion	14
Abb. 8: Details zur Konstruktion im Inneren der Segelmaschine	15
Abb. 9: Betriebsraum	16
Abb. 10: Blick von hinten in den Betriebsraum	16
Abb. 11: Fundamentsektion	17
Abb. 12: Aufstieg mit Ruhepodesten.....	17
Abb. 13: Serviceluke	18
Abb. 14: Montagendeckel für obere Rotorlagerung	19
Abb. 15: Auszug aus Datenblatt für Loslager oben	20
Abb. 16: Auszug aus Datenblatt für Rollenlager unten	21
Abb. 17: FEM Analyse der Stützstruktur des Hinterkastens	22
Abb. 18: FEM Analyse der Aussenhaut des Hinterkastens	22
Abb. 19: Außenhaut Hinterkasten	23
Abb. 20: Vertikales vorderes Schott des Hinterkastens.....	23
Abb. 21: Innere Struktur Hinterkasten	23
Abb. 22: Explosionszeichnung der Segelmaschine	25
Abb. 23a + b: Fertigungszeichnungen Endscheibe	26
Abb. 24: Beispiel Stückliste.....	27
Abb. 25: INNOVEN Firmengelände mit möglichem Teststands-Stellplatz	28
Abb. 26: Fundament-Sektion der Segelmaschine = Teststandsfundament	29
Abb. 27: Windverteilung und betrachteter Windgeschwindigkeitsbereich	32
Abb. 28: Excel Tool zur Berechnung der Leistungseinsparung	32
Abb. 29: Amortisationszeit für eine Segelmaschine in Abhängigkeit des Bunkerpreises ..	34

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
DNV/GL	Det Norske Veritas / Germanischer Lloyd (Klassifikationsgesellschaft)
INNOVEN	Innoven GmbH, Westkai 34, 27572 Bremerhaven
LNG	Liquid Natural Gas, verflüssigtes Erdgas (alternativer Brennstoff)
SKF	Svenska Kullagerfabriken, Lagerhersteller, Deutschlandsitz: Schweinfurt
THB	Täglicher Hafenbericht, Maritime Tageszeitung

Literaturverzeichnis

THB Nr. 162. (22. August 2018). "Cruise-Reeder müssen jetzt liefern". *THB Nr. 162*, S. 1.

THB Nr. 181. (18. September 2018). "Nachhaltigkeit schwer umzusetzen". *THB Nr. 181*, S. 2.

Auszüge mit freundlicher Genehmigung der THB Redaktion

1. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Entwicklungstätigkeiten für den Entwurf eines Prototyps einer sogenannten Segelmaschine. Hierbei handelt es sich um eine weiterentwickelte Segelrotor-Technologie basierend auf dem Magnus Effekt. Anton Flettner machte sich mit seinem Flettner Rotor bereits in den 1920er Jahren die gleichen physikalischen Eigenschaften eines rotierenden Zylinders in der Windströmung zu Nutze. Wie ein vorgeschaltetes Projekt zur Grundlagen Untersuchung ergab, weist die hier beschriebene Segelmaschine allerdings ein um 30 bis 40 % (je nach Betriebsbedingungen) höheres Potenzial zur Energieeinsparung auf Seeschiffen auf, als der klassische Flettner Rotor. Für Details sei hier auf den Abschlussbericht des DBU Projektes Nr. 29668 verwiesen.

Die vorliegende Arbeit umfasst das Basic Design, die Erstellung der Lastannahmen nach zulassungsrelevanten Richtlinien des Germanischen Lloyd und die Optimierung der Segelmaschine basierend auf den Ergebnissen der Finite Elemente Analysen.

Als Vorbereitung der nächsten Schritte zur Erprobung und Vermarktung dieser Technologie wird der notwendige Test- & Prüfstand an Land vorentworfen.

Abschließend wird mit Hilfe der Massenbilanz eine Kostenabschätzung für die Segelmaschine, besonders auch hinsichtlich einer möglichen Serienfertigung, vorgenommen. Aufgrund der zu erwartenden mittleren Treibstoffeinsparung und der aktuellen Treibstoffpreise wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse erstellt, die erstmalig einen Marktausblick für diese Technologie ermöglicht. Mit Hilfe der Wirtschaftlichkeitsanalyse konnte gezeigt werden, dass je nach Windverhältnissen im Seegebiet und den aktuellen Bunkerkosten eine Amortisation nach 2 bis 6 Jahren realistisch erreicht werden kann. Damit ist jetzt die richtige Zeit, einen Prototyp zu bauen und die Markteinführung zu starten.

2. Einleitung

Zurzeit ist die Reduzierung der Schadstoff Emissionen aus der Seeschifffahrt aktueller denn je. Neue Richtlinien der IMO und anderer Institutionen fordern die schrittweise Reduktion der CO₂-, NO_x- und SO_x-, sowie der Ruß-Emissionen der Seeschifffahrt in den nächsten Jahren.

Die Reaktionen und Aktivitäten der beteiligten Reeder und Zulieferer beschränken sich im Wesentlichen auf den Einbau von Entschwefelungsanlagen und Katalysatoren und den Einsatz von LNG als Schiffs-Treibstoff der Zukunft.

Artikel wie der unten gezeigte Auszug eines aktuellen THB Beitrages zeigen, dass die Schifffahrt unter hohem Druck der Öffentlichkeit steht. Allerdings bedeuten die Nachrüstungen für Abgas- Nachbehandlungsanlagen immer auch erhebliche Investitionen und eine Erhöhung der technischen Komplexität der Schiffe mit entsprechendem Wartungsaufwand, welcher einher geht mit immer niedrigerem Ausbildungsniveau der Schiffsbesatzungen.

Cruise-Reeder müssen jetzt liefern

Umwelt-Organisation Nabu legt zum achtenmal in Folge Kreuzfahrt-Ranking vor – Lob für „AIDAnova“

Die weltweite Kreuzfahrt-Industrie ist in der Masse noch weit davon entfernt, ihrem selbst zelebrierten Anspruch, eine umweltbewusste Branche zu sein, auch tatsächlich zu entsprechen. Sie muss liefern.

Diesen Rückschluss lässt das am Dienstag in Hamburg vorgestellte „Kreuzfahrt-Ranking“ des Umweltverbandes Nabu zusammenfassen. Es wurde in den zurückliegenden Wochen zum achtenmal in Folge erstellt. 76 moderne Kreuzfahrtschiffe wurden von den Experten vor allem im Hinblick auf saubere und damit umweltfreundliche Antriebstechnik hin unter die Lupe genommen.

Aus dieser Gruppe erkannten die Nabu-Experten lediglich für die „AIDAnova“ der in Rostock ansässigen Reederei Aida Cruises eine „saubere“ Technologie an. Symbolhaft verlieh der Nabu „grüne Schiffs-

propeller“ für saubere Technik. „Rote Propeller“ erhielten hingegen all jene Schiffe und Reedereien, die es aus Sicht des Verbandes beim Umweltschutz über Lippenbekenntnisse nicht weit hinauskämen.

Der jüngste Neubau der Kusmundflotte sollte planmäßig am Dienstagabend und damit deutlich nach THB-Redaktionsschluss auf der Papenburger Meyer Werft ausgedockt werden. Die „AIDAnova“ wird als erstes Kreuzfahrtschiff der Welt mit Flüssiggas (LNG) betrieben“, betonte Dietmar Oeliger, Leiter Verkehrspolitik beim Nabu-Bundesverband in Berlin.

Der neue Aida-Luxusliner, der noch ein Schwesterschiff bekommen wird, ist mit mehr als 2600 Passagierkabinen ausgerüstet. Nach den Restarbeiten

Rauchzeichen: Cruiselinier in der Ostsee



Fortsetzung Seite 2 ▶

Photo: Anrecht

▶ Fortsetzung von Seite 1

und verschiedenen obligatorischen Probefahrten soll der Gigant dann Mitte November an die Reederei übergeben werden.

LNG sei zwar emissionsärmer als Dieselmotorkraftstoff, doch der Nabu weist auch darauf hin, dass Flüssiggas in der Umweltbilanz von der Förderung bis zur Verbrennung her nicht unbedingt wesentlich vorteilhafter sei.

„Wir sehen die Branche am Scheideweg“, führte Dietmar Oeliger weiter aus. Reedereien wie besagte Aida Cruises aber auch die zum TUI-Konzern gehörende Hapag-Lloyd Cruises aus Deutschland gäben derzeit in Sachen „umweltfreundliche Antriebe“ den Takt vor. Bei den anderen Branchengrößen sehe es jedoch eher ernüchternd aus, findet der Nabu. „Jetzt sind auch die Wettbewerber gefragt, deutlich mehr in diesem Bereich zu investieren“, meint Oeliger.

Insgesamt sind nach Einschätzung des Nabu immer noch zu viele Schiffe ohne moderne Abgastechnik oder emissionsarmen Treibstoff unterwegs. Es sei ein Skandal, dass 2018 noch Schiffe auf den Markt kämen, die auf Schweröl ausgelegt seien.

Vor diesem Hintergrund müsse auch und gerade seitens der Politik mehr Druck auf die Cruise-Industrie aufge-

baut werden, forderte Malte Siebert, Leiter Umweltpolitik beim Nabu in Hamburg. Dabei sprach er sich sogar für einen radikalen Schritt aus: „Ein Einfahrverbot für dreckige Schiffe ab 2020 in den Häfen.“

Und auch Nabu-Bundesgeschäftsführer Leif Müller meinte, dass „mehr Hafenstädte und besonders schützenswerte Regionen endlich Einfahrverbote für schmutzige Kreuzfahrtschiffe verhängen“. Dass ein solcher Schritt umsetzbar sei, zeige Norwegen. So wolle die Regierung in Oslo verschiedene Fjorde, darunter zum Beispiel den weltberühmten Geirangerfjord in wenigen Jahren für

Dreckschleudern vollständig dicht machen.

Siebert meinte weiter, dass „die Reeder ausreichend Zeit hatten, sich zu entscheiden, ob sie wirkungsvolle Abgastechnik an Bord installieren, sauberen Kraftstoff verbrennen oder sich extern mit Landstrom versorgen lassen.“ Nach seiner Überzeugung mangle es nicht an Möglichkeiten, „sondern am Willen der politischen Entscheider, der Kreuzfahrtbranche etwas abzufordern“, unterstrich er. Denn die enormen gesundheitlichen Gefahren von Schiffsemissionen seien nicht länger tragbar.

Der Branchenverband Clia machte indes deutlich, dass

Rote Sterne, grüne Sterne

Nabu untersuchte 76 Cruise-Liner - Eine Auswahl

Reederei	Schiffe	Jungfernfahrt	Wertung
AIDA	AIDAnova	2018	★ ★ ★ ★
Hapag-Lloyd	Europa 2	2013	★ ★ ★ ★
AIDA	AIDAprima/ AIDAperla	2015-2017	★ ★ ★ ★
TUI	Mein Schiff 1/3/4/5/6	2014-2018	★ ★ ★ ★
AIDA	AIDAsol	2007-2013	★ ★ ★ ★
Ponant	Le Champlain/ Le Laperouse	2018	★ ★ ★ ★
Hapag-Lloyd	Bremen/ Hanseatic/ Europa	1990-1993	★ ★ ★ ★
Carnival	Horizon	2018	★ ★ ★ ★
Royal Caribbean	Symphony of the Seas	2018	★ ★ ★ ★
MSC	Seaview	2018	★ ★ ★ ★

Weitere Informationen zur Wertung: www.nabu.de/kreuzfahrtranking2018

Quelle: Nabu

(THB Nr. 162, 2018)

LNG als Treibstoff der Zukunft erfordert hohe Investitionen an Land und auf den Schiffen, wobei der umwelttechnische Nutzen, näher analysiert eher gering ausfällt. Zu dem Thema sei auf entsprechende Untersuchungen und Veröffentlichungen hingewiesen.

An Technologien, welche signifikant den eigentlichen Energiebedarf der Schiffe senken wird nur wenig geforscht. **Aber nur die eingesparte** und gar nicht erst verbrannte Tonne Treibstoff spart Geld und hilft gleichzeitig der Umwelt!

Vor diesem Hintergrund werden die Marktchancen für alternative Antriebssysteme wie der hier untersuchten Segel Technologie als gut angesehen mit der Tendenz zur weiteren Verbesserung in den nächsten Jahren (siehe oben). Auch für die zukünftig wachsende Anzahl an autonom betriebenen Seeschiffen ist der hier vorgestellte Windzusatzantrieb wegen seiner einhundert-prozentigen Automationsfähigkeit hervorragend geeignet.

Um mit dem Wind als zusätzlichem Schiffsantrieb zur Treibstoffeinsparung einen möglichst großen Nutzen für die Umwelt zu erreichen, ist die breite Anwendung - heißt auf möglichst vielen Schiffen einsetzbare - Massenproduktion der Segelmaschine anzustreben.

Deshalb wurde in dem vorliegenden Projekt eine Universalgröße der Segelmaschine entworfen, die auf allen Schiffstypen ab ca. 80 Metern Länge effektiv einsetzbar ist.

Das heißt, je nach Schiffsgröße variiert nur die optimale **Anzahl** der Segelmaschinen an Bord, welche in Ihrer technischen Ausführung immer gleich sind und in Serie gefertigt werden können.

3. Aufgabenstellung nach Arbeitspaketen

Die Aufgabenstellung des hier beschriebenen Projektes bezieht sich auf einen Entwicklungsprozess für den Prototyp einer Segelmaschine als Vorbereitung zum späteren Bau einer solchen Maschine.

Der Entwicklungs-Prozessablauf ist nach Arbeitspaketen sortiert, die logisch aufeinander aufbauen.

- 1) Design Basis definieren. Heißt Festlegung was soll die Segelmaschine leisten für welche Einsatzbedingungen und auf welchen Schiffsgößen.
- 2) Aufbauend auf der Spezifizierung von 1) wird ein Vordesign des Prototyps erstellt. Das heißt Festlegung der Struktur, Größe, Materialien, Lager Konzept etc.
- 3) Mit dem Vordesign aus 2) werden die Lastannahmen nach zertifizierungsfähigen Richtlinien z.B. DNV/GL für Extrem und Betrieb erstellt.
- 4) Die 3D-CAD Konstruktion wird mit den Ergebnissen der Festigkeitsuntersuchungen (FEM), die mit den Lasten aus 3) berechnet werden, verfeinert und optimiert.
- 5) Wenn die Festigkeitsrechnung der Struktur zufriedenstellende Ergebnisse liefert, wird das 3D-CAD Modell als fertig und bau-bar definiert. Jetzt ist auch die Menge und Ausführung von erforderlichem Material festgelegt.

- 6) Aus dem optimierten 3D-CAD Modell werden nun für die einzelnen Baugruppen 2D-Fertigungszeichnungen und Stücklisten abgeleitet. Hiermit ist die Grundlage zum Baustart eines Prototyps geschaffen.

Vor dem Einsatz auf einem Schiff, für die Erprobung, Zertifizierung, Automations-Entwicklung (Software) und Optimierung ist es unerlässlich, einen Prüfstands-Lauf für den Prototyp der Segelmaschine durchzuführen.

Der Vorentwurf eines solchen Testaufbaus und die Definition der Ziele sind ebenfalls Bestandteil des vorliegenden Projektes.

Abschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse basierend auf der Massenbilanz des Prototyps (s.o.) durchgeführt, welche zeigt, in wieweit jetzt der Zeitpunkt richtig ist, um in diese Technologie zu investieren.

In den folgenden Kapiteln werden nun die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete dargestellt und beschrieben.

4. Hauptteil entsprechend der Arbeitspakete

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden in diesem Kapitel vorgestellt, beschrieben und mit Abbildungen veranschaulicht. Da es den Umfang dieses Dokumentes sprengen würde, alle erstellten Zeichnungen, Abbildungen, Stücklisten usw. im Text darzustellen, befinden sich einige Beispiele im Anhang.

4.1. Design Basis

Ziel war es eine Segelmaschine zu entwickeln die ein möglichst großes Marktsegment bedienen kann. Bewusst wurde nicht auf eine individuelle Größe mit optimalem Gewicht und Kosten für einen bestimmten Schiffstyp fokussiert. Grund hierfür ist die Überzeugung das für jedes Projekt ein neues Design je nach Fahrtroute und Schiffsgröße anzufertigen weder praktikabel noch kosteneffizient ist, zumal dann keine Serienfertigung möglich wäre. Vielmehr wurde der Konstruktionsschwerpunkt auf robusten einfach herzustellenden Stahlbau aus weltweit gut verfügbaren Materialien gelegt. Auch der rotierende Teil der Segelmaschine soll kosteneffektiv aus Stahl z.B. als Spiralrohr automatisiert gefertigt werden können.

Um ein möglichst großes Marktsegment zu bedienen, wurden die Lastannahmen für eine Schiffsgröße mit Länge bis 250 m und einer Deckshöhe = 10 m über Wasserlinie nach DNV/GL Richtlinie erstellt. Als Extrem-Windgeschwindigkeit wurde ein konservativer Wert von 70 m/s angenommen. Mit diesen Auslegungsparametern sollte diese Segelmaschine für Schiffsgrößen zwischen 100 m und 300 m Länge geeignet sein und damit auf geschätzten 80 % der seegängigen Schiffe in unterschiedlicher Anzahl eingesetzt werden können.

4.2. Pre-Design & Hauptabmessungen WD 112

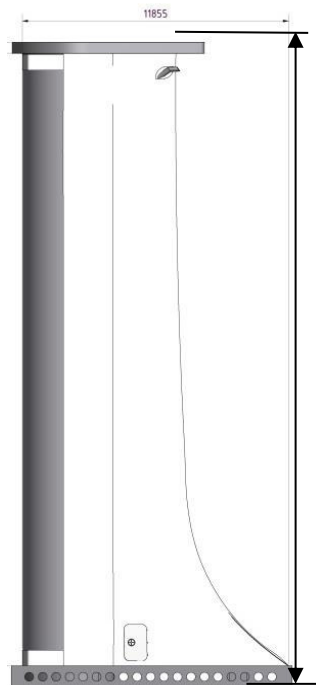
Die maximale Durchfahrtshöhe sollte nicht über 40 m liegen, da hierdurch das Einsatzgebiet des Schiffes durch den Windantrieb eingeschränkt werden könnte (z.B. Nord-Ostsee Kanal). Daraus ergibt sich bei einer Deckshöhe von 10 m über Wasserlinie eine zulässige Gesamthöhe der Segelmaschine von kleiner 30 m. Gewählt wurden 28 m Höhe um Reserve für Ballastfahrt zu berücksichtigen.

Der Rotor sollte ohne Sondergenehmigungen Straßen-transportfähig sein, so daß der Durchmesser auf vier Meter festgelegt wurde. Damit ergibt sich eine aktive Segelfläche pro Maschine von ca. 100 m².

Um die hier behandelte innovative Technologie von dem traditionsbehafteten Begriff des Segelns abzugrenzen wurde als Typenbezeichnung schlicht „WD 100“ (für Wind Drive 100 m²) gewählt.

Je nach Größe des Schiffes und Höhe der beabsichtigten Kraftstoffeinsparung können bis zu acht solcher Windantriebe pro Schiff installiert und von einer zentralen Steuerung automatisiert betrieben werden.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die ersten CAD Daten des Vor-Entwurfes einer WD 100 Segelmaschine.



Gesamthöhe über Deck = 28 Meter

Abb. 1: Seitenansicht WD 100

Technische Daten WD 100

Aktive Segelfläche	= 100 m ²
Rotor-Drehzahl	= 50 bis 450 rpm
El. Antriebsleistung	= max.90 kW

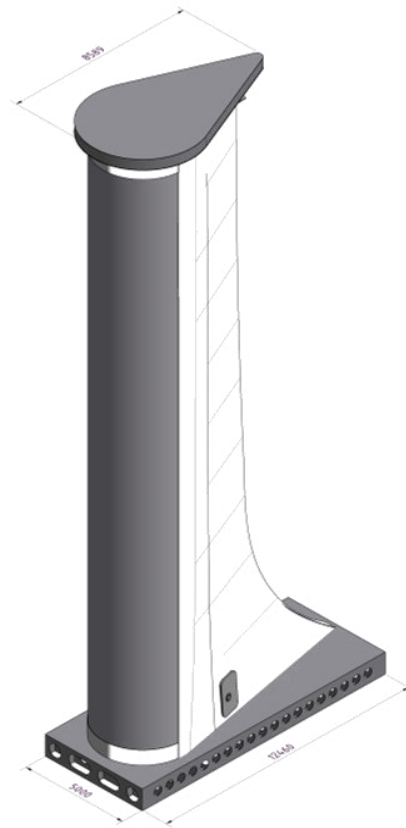


Abb. 2: Ansicht schräg von vorne

4.3. Erstellung der Lastannahmen

Mit der Geometrie des Vor- Entwurfs sollten nun Lastannahmen für die weiteren Detail-Konstruktion ermittelt werden, welche später auch zur Zertifizierung durch eine IACS Schiffsklassen-Organisation verwendet werden können.

Zurzeit gibt es keine Richtlinien speziell für die Berechnung von Segel-Rotoren. Deshalb wurde auf naheliegende Richtlinien z. B. für die Auslegung von Bordkränen und Decksaufbauten zurückgegriffen.

Maßgebend für die Bestimmung der Extremlasten sind:

1. Maximale Windlasten
2. Lokale Maximallasten aus Seeschlag
3. Maximallasten aus den Schiffsbewegungen, entsprechend den maximal im Seegang auftretenden Beschleunigungen.

Für die Lasten aus 2. und 3. wurde ein Schiff mit 10 m Deckshöhe über Wasserlinie und einer Gesamtlänge von 250 m zu Grunde gelegt.

Die maximale Windgeschwindigkeit wurde mit 70 m/s angenommen und die aerodynamischen Beiwerte der Segelmaschine zur Ermittlung der extremen Windlasten verwendet.

Die gewählten Annahmen wurden bewusst konservativ gewählt, um später die Zertifizierung zu erleichtern und um einen möglichst großen Anteil an Schiffstypen mit dem gleichen WD 100 Design ausrüsten zu können. Hierbei liegt die Überzeugung des Verfassers zu Grunde, daß die Kostenvorteile einer möglichen Serienfertigung einen zum Teil erhöhten Materialeinsatz mehr als kompensieren.

Eine Optimierung / Überarbeitung der Maschine ist nach den ersten Betriebserfahrungen an Bord und vor Start der Fertigung größerer Stückzahlen in der Regel ohnehin erforderlich.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Quellen aus der DNV GL Richtlinie welche zur Ermittlung von Extremlasten verwendet wurden.

Load Calculation, Sources			
Calculation of extreme wind loads			
Calculated with max. drag and lift coefficients of sailmachine, a windspeed of 70 m/s and projected areas of sailmachine			
Alternativ calculation according to GL Rules for Classification and Construction			
Rules	VI	Additional Rules and Guidelines	
Part	2	Loading Gear	
Chapter	2	Loading Gear on Seagoing Ships and Offshore Installations	
Section	3	Design and Calculation Principles	
Paragraph	B.4.5	Wind loads ($\Rightarrow v_{\text{wind}} = 63 \text{ m/s}$, $c_D = 1.6$)	
External sealoading			
Calculated according to GL Rules for Classification and Construction			
Rules	I	Ship Tehnology	
Part	1	Seagoing Ships	
Chapter	1	Hull Structures	
Section	4	Design Loads	
Paragraph	B.8	Load on superstructure end bulkheads, deckhouse walls, transverse hatch coamings and hatch cover skirt plates	
Loads due to seaway induced ship motion			
Calculated according to GL Rules for Classification and Construction			
Rules	VI	Additional Rules and Guidelines	
Part	2	Loading Gear	
Chapter	2	Loading Gear on Seagoing Ships and Offshore Installations	
Annex	A	Calculation of Dynamic Forces due to Motion of the Ship	

Abb. 3: verwendete Richtlinien zur Ermittlung der Extremlasten

Die hieraus ermittelten Extremlasten zeigt die nachfolgende Abbildung 4.

Blau entspricht den Biegemomenten aus Extrem-Wind, aufgetragen über der Höhe über Deck (y-Achse).

Rot entspricht Momenten aus Seeschlag (bis zu einer Höhe von max. 15 m über Deck relevant).

Grün zeigt die Momente aus Schiffsbewegungen im Seegang.

Zu den Bezeichnungen:

F_x = Kraft in Schiffslängsrichtung, erzeugt das Moment M_y

F_y = Kraft in Schiffsquerrichtung erzeugt das Moment M_x

F_z = Vertikalkraft nur relevant für Lasten aus Schiffsbeschleunigung

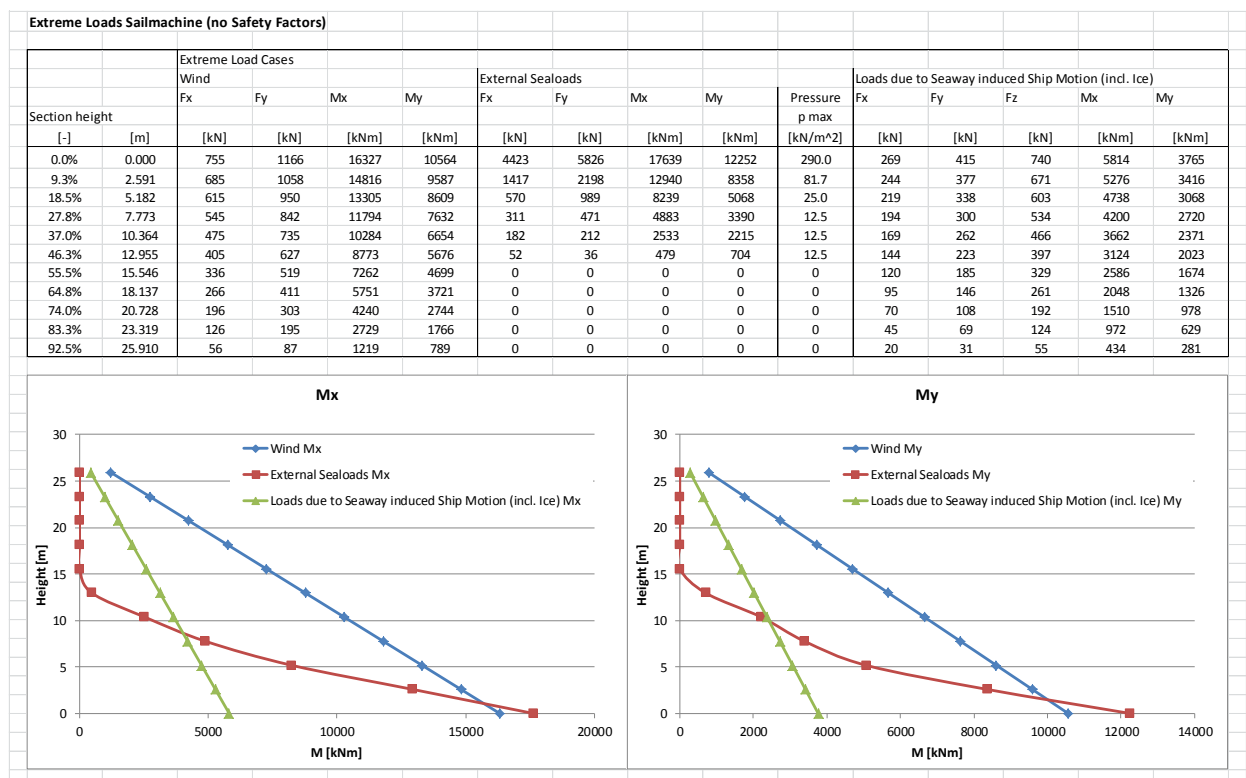


Abb. 4: Berechnung der Extremlasten/-momente

Für die statische Bemessung der Segelmaschine werden die Einzelkräfte jeweils für die entsprechende Höhe aufsummiert. Grund hierfür ist, daß die maximale Windlast mit der maximalen Schiffsbewegung und dem maximalen Seeschlag plausibel zeitgleich auftreten könnten.

Neben der Bemessung der Struktur für Extremlasten (statischer Nachweis) ist ebenso eine Analyse der dynamischen Betriebslasten gegen Ermüdung erforderlich.

Dynamische Betriebslasten werden hervorgerufen durch die Bewegungen des Schiffes und damit auch der Segelmaschine und durch die wechselnden Schublasten aus den unterschiedlichen Windverhältnissen.

Die Tabelle in Abbildung 5 zeigt die verwendete GL-Richtlinien zur Berechnung der dynamischen Betriebslasten.

Fatigue load spectrum and number of cycles			
Based on GL Rules for Classification and Construction			
Rules	I	Ship Technology	
Part	1	Seagoing Ships	
Chapter	2	Hull Structures	
Section	20	Fatigue Strength	
Paragraph	A.2.4		

Abb. 5: verwendete Richtlinien zur Ermittlung der dynamischen Betriebslasten

Die Betriebslasten wurden für eine Betriebsdauer von 30 Jahren berechnet und sind in Abbildung 6 dargestellt.

Sie dienen der ermüdungsfesten Auslegung der Detailstruktur wie Ausführung von Aussteifungen, Schweißnähten etc.

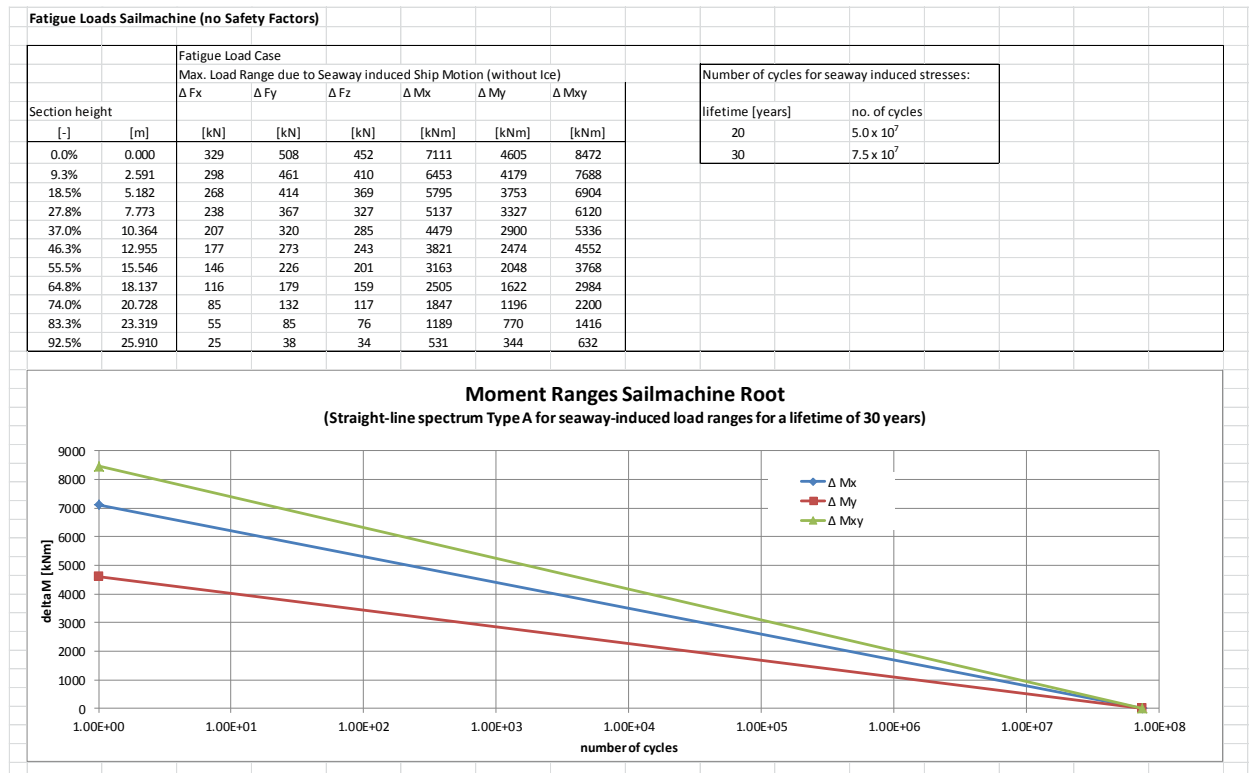


Abb. 6: Berechnung der Betriebslasten/-momente

Basierend auf den Lastannahmen wurde dann der Entwurf der WD 100 Segelmaschine weiterentwickelt, wie das folgende Kapitel zeigt.

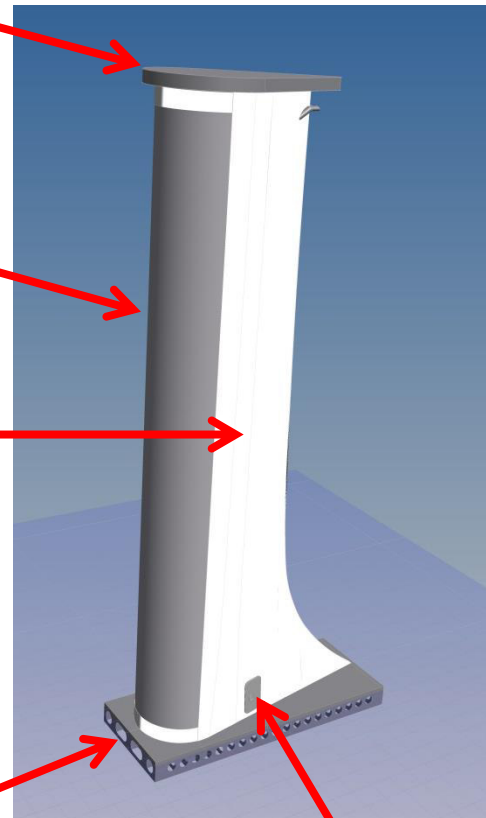
4.4. 3D CAD Konstruktion & Rotor-Lagerung

Auf Basis der Lastannahmen und FEM Berechnungen wurde die Segelmaschine weiterentwickelt. Die folgenden Abbildungen geben Einblick in die Details des 3D CAD Modells.

Stationäre Endscheibe mit integriertem Rotorlager oben

Rotor (grau dargestellt) aus Stahl

Stationärer Hinterkasten (weiss), beinhaltet die Antriebstechnik und kann zusätzliche Versorgungsschächte des Schiffes aufnehmen wie Lüfter-



Fundamentsektion, beinhaltet den unteren Traglagertopf sowie alle Aussteifungen, um die Kräfte der Segelmaschine in den Schiffskörper zu übertragen. Es ist vorgesehen die Fundamentsektion mit der Segelmaschine als einen Lieferumfang anzubieten. Das vermeidet Ungenauigkeiten auf der Baustelle und der Schiffskörper braucht lokal dann nicht weiter angepasst werden.

Zugang zum Hinterkasten

Abb. 7: Details zur Konstruktion

Weitere Einblicke in die Stahlbau Struktur sind in folgendem Längsschnitt ersichtlich:

Verschließbare Mannlöcher
oben und unten ermöglichen
den Zugang zum Rotor

Das Auswuchten des
Rotors beim Hersteller
ist für die Funktion und
Lebensdauer sehr
wichtig. Die
notwendigen
Ausgleichsmassen
werden im Rotor auf

Aussteifungen oben und
unten, um die
Rotorkräfte in die
Lagerzapfen abzuleiten

Traglagertopf unten eingebunden in die
Fundamentsektion

Antriebseinheit mit
Umrichter,
Antriebsmotor und
Riementrieb

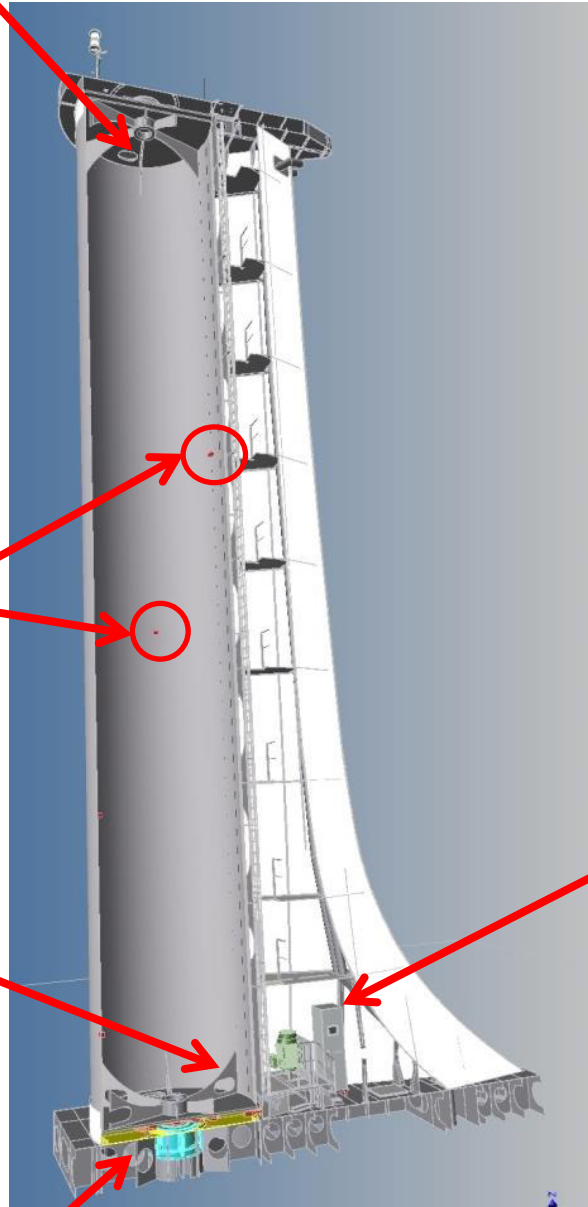


Abb. 8: Details zur Konstruktion im Inneren der Segelmaschine

Weitere Details aus der Antriebseinheit auf Deckshöhe:

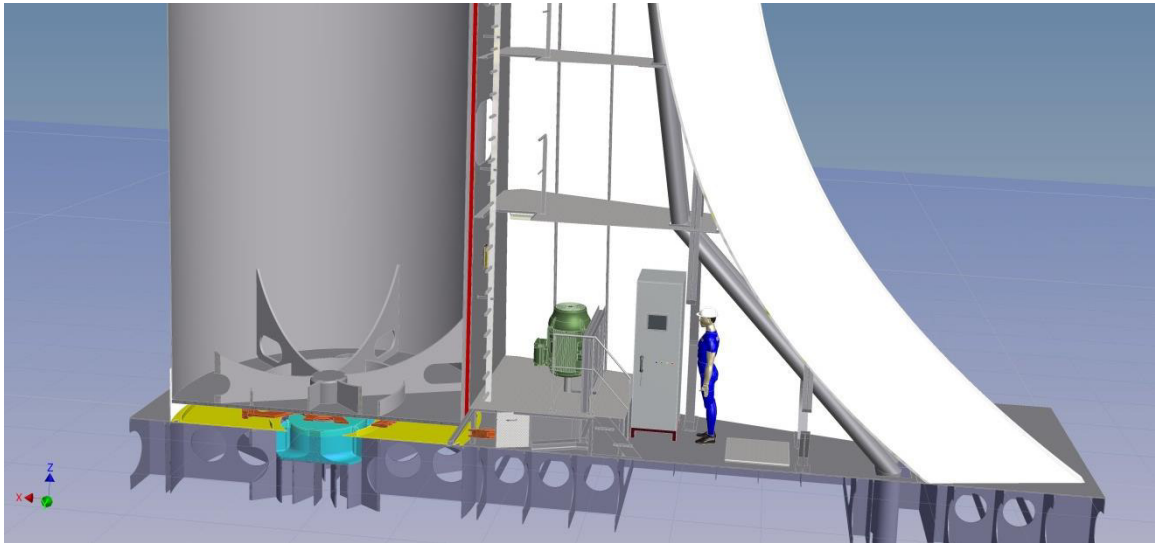


Abb. 9: Betriebsraum

Im Hinterkasten auf Deckshöhe ist ein Betriebsraum angeordnet, in dem der Umrichter, die Steuerung, der elektrische Antrieb und der Aufstieg nach oben untergebracht sind. Der Zugang für Wartungsarbeiten oder evtl. Tausch von Komponenten ist damit optimal gelöst.

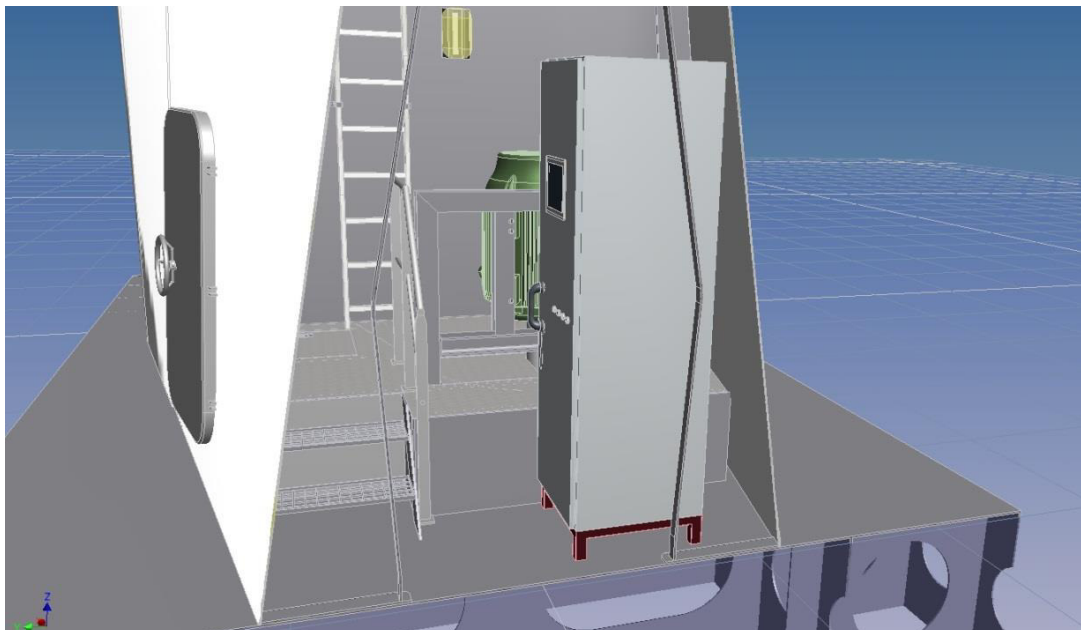


Abb. 10: Blick von hinten in den Betriebsraum

Abbildung 10 zeigt den Blick in den Betriebsraum von achtern (hinten). Die Platzverhältnisse bieten angemessenen Raum für sicheres effektives Arbeiten.

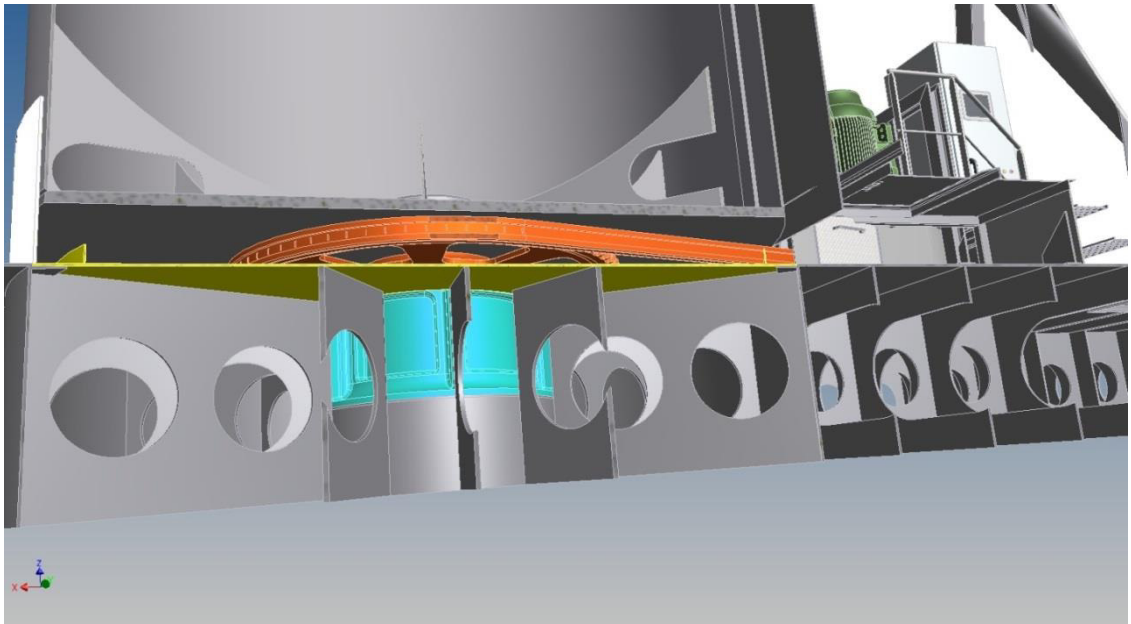


Abb. 11: Fundamentsektion

Die Fundamentsektion enthält den unteren Traglagertopf (blau), welcher die untere ölgeschmierte Lagerung aufnimmt. Darüber befindet sich der Riementrieb (orange) mit dem eine Übersetzung von 1:3 zwischen Rotor und Antriebsmotor realisiert wird. Dadurch kann auf ein Getriebe verzichtet werden, was große Vorteile hinsichtlich der Luft und Körperschallemissionen der Maschine hat.



Abb. 12: Aufstieg mit Ruhepodesten

Blick von oben entlang der Aufstiegsleiter mit Zwischen(ruhe)podesten. Arbeitssicherer Aufstieg, auch mit Werkzeug ist sichergestellt. Ausreichender Abstand zu den Abgasrohren links im Bild ist ebenfalls gewährleistet. Der Aufstieg wird benötigt um zur

Service Luke in der Endscheibe zu gelangen.

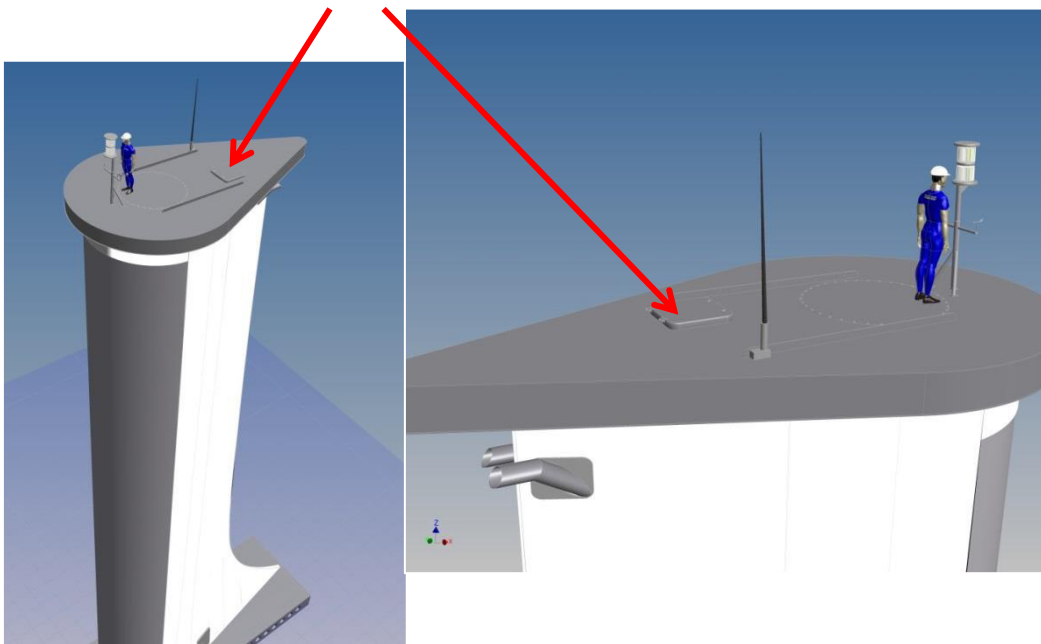


Abb. 13: Service Luke

Durch diese Service Luke gelangt man in Freie und sie ist notwendig um Wartungs- / Reparaturarbeiten an hier oben installierten Geräten zu ermöglichen. Hierzu gehören Funkantennen, ein Geräteträger für Windgeschwindigkeits- und scheinbare Windrichtungsmessung welche als Eingangsgrößen für die Steuerung und der Ermittlung der Soll-Rotordrehzahl verwendet werden.

Außerdem wird der Geräteträger verwendet, um Navigationslichter zu tragen.

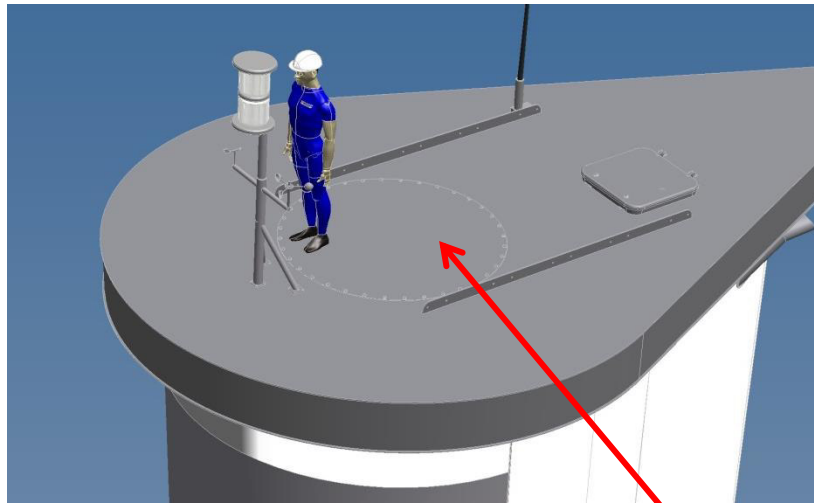


Abb. 14: Montagedeckel für obere Rotorlagerung

In der Endscheibe ist ausserdem ein runder, verschraubter Montagedeckel integriert, durch den das obere Rotorlager für Montage und Wartung zugänglich ist.

Rotor Lagerkonzept

Das grundsätzliche Konzept beruht darauf, dass das Rotoreigengewicht ausschließlich durch das untere Lager aufgenommen wird. Alle radialen Rotorkräfte aus Segelbetrieb und Seegang werden ebenfalls durch das untere Lager und das obere Stützlager aufgenommen. Das obere Stützlager wird als axiales Loslager ausgeführt, so daß hier Längenänderungen des Rotors aus Temperatur Einwirkung berücksichtigt werden.


Die führenden Wälzlagerhersteller wurden für die Auslegung der Lagerung mit den vorhandenen Lastannahmen und einer Sollbetriebszeit von 150.000 Stunden kontaktiert.

Die Auswahl fiel zunächst für den Prototyp auf eine von SKF vorgeschlagene kosteneffektive Lagerung mit zwei Pendelrollenlagern.

Hierbei besteht das untere Traglager aus dem Typ 22380 CA/W33 und ist ölgeschmiert. Hierfür wird eine Umlaufschmierung mit Luftrückkühlung im Betriebsraum auf Deckshöhe installiert werden.

Das obere Loslager besteht aus dem Typ 22322 E und kann mit Fettschmierung betrieben werden. Das wird als großer Vorteil angesehen, da hierdurch eine Umlaufschmierung mit Leitungen nach oben und entsprechender Abdichtung des Lagergehäuses entfällt. Damit ist die Gefahr von Ölleckagen im Betrieb drastisch reduziert.

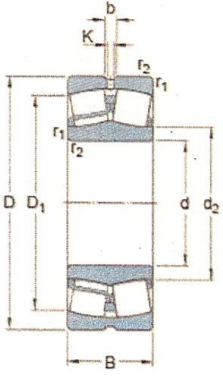
Beide Lager können an Bord während einer Reparaturzeit/ Wertzeit ohne komplette Demontage der Segelmaschine ausgetauscht werden. Auszüge aus den Datenblättern der gewählten Lager zeigen die Abbildungen 15 und 16.



22322 E
Popular item
SKF Explorer Lager

Loslagerung (oben)
Fettgeschmiert

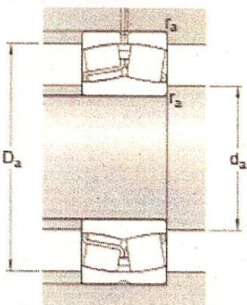
Abmessungen



Pendelrollenlager

d	110	mm
D	240	mm
B	80	mm
d ₂	≈ 143	mm
D ₁	≈ 204	mm
b	13.9	mm
K	7.5	mm
r _{1,2}	min. 3	mm

Anschlussmaße



d _a	min. 124	mm
D _a	max. 226	mm
r _a	max. 2.5	mm

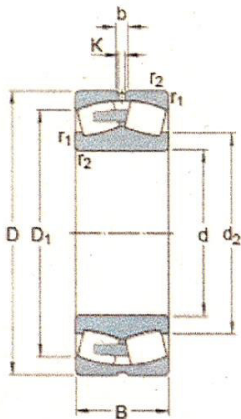
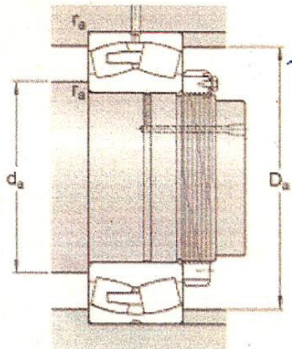
Abb. 15: Auszug aus Datenblatt für Loslager oben

SKF

Festlagerung (unten) 150.0504
 Ölgeschmiert

22380 CAW33

 Popular item
 SKF Explorer Lager

Abmessungen

Anschlussmaße

Pendelrollenlager

d	400	mm
D	820	mm
B	243	mm
d ₂	≈ 534	mm
D ₁	≈ 697	mm
b	22.3	mm
K	12	mm
r _{1,2}	min. 7.5	mm

d _a	min. 432	mm
D _a	max. 788	mm
r _a	max. 6	mm

Abb. 16: Auszug aus Datenblatt für Rollenlager unten

4.5. Ergebnisse FEM Analysen

Die Stahlstruktur des Prototyps wurde mit Finite Elemente Berechnungen optimiert. Hierfür wurde die Software Ansys 16.0 verwendet.

Das erstellte Modell wurde aus 641.000 Elementen, nämlich Flächenteile möglichst als Schalenelemente (Hexaeder, Wedges) und übrige Komponenten aus Volumenelementen (Tetraeder, Hexaeder und Wedges) nachgebildet. Die ersten Berechnungen zeigten unter Extremlast noch relativ große Bereiche mit unzulässigem Spannungsniveau sowohl in der Außenhaut als auch in der inneren Stützstruktur des Hinterkastens.

Beispiele in Abbildungen 17 und 18.

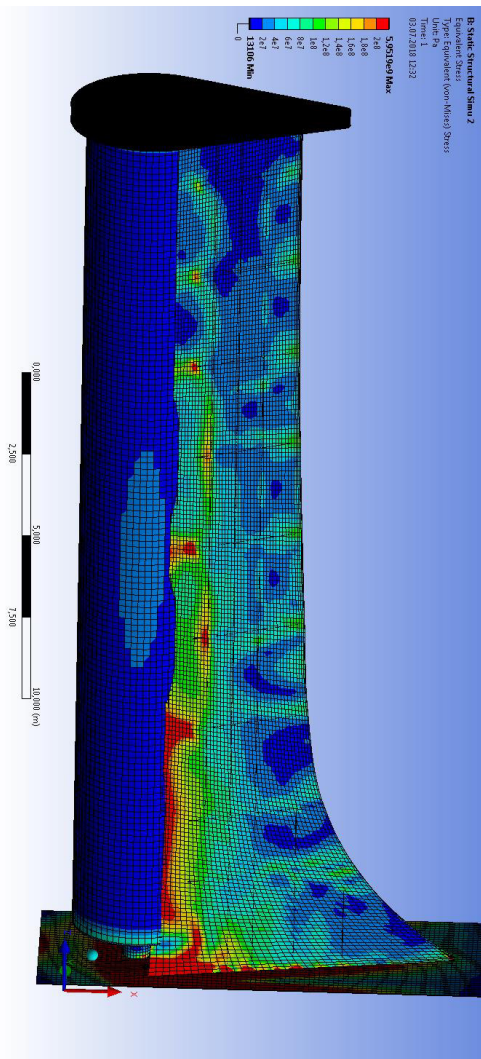


Abb. 18: FEM Analyse der Aussenhaut des Hinterkastens

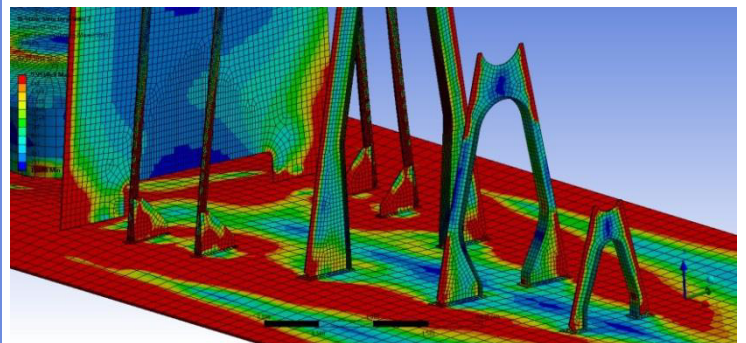


Abb. 17: FEM Analyse der Stützstruktur des Hinterkastens

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde in insgesamt acht Iterationsschleifen der Stahlbau optimiert und durch lokale Verstärkung, Ausrundung usw. die Spannungen auf zulässige Werte gesenkt.

Diese Berechnungen waren von großer Bedeutung weil nur damit erstmalig eine realistische Massenabschätzung der Segelmaschine ermöglicht wird. Diese ist unerlässlich, um eine Kostenabschätzung und Wirtschaftlichkeitsberechnung durchzuführen.

Die folgenden Abbildungen 19, 20 und 21 zeigen beispielhaft das Spannungsniveau unter Extremlast nach den Optimierungsarbeiten. Es konnte eine für einen Prototyp angemessene Stahlstruktur geschaffen werden, welche in allen Bereichen akzeptable Spannungen kleiner 200 N/mm^2 ausweist. Die Abbildungen zeigen die Berechnungsergebnisse für eine extreme Querkraft $F_y = 1200 \text{ kN}$.

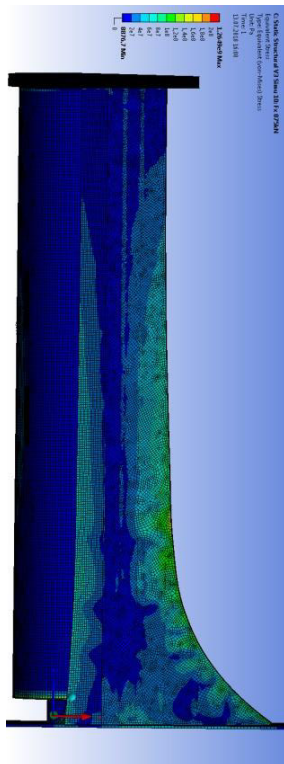


Abb. 19: Außenhaut Hinterkasten

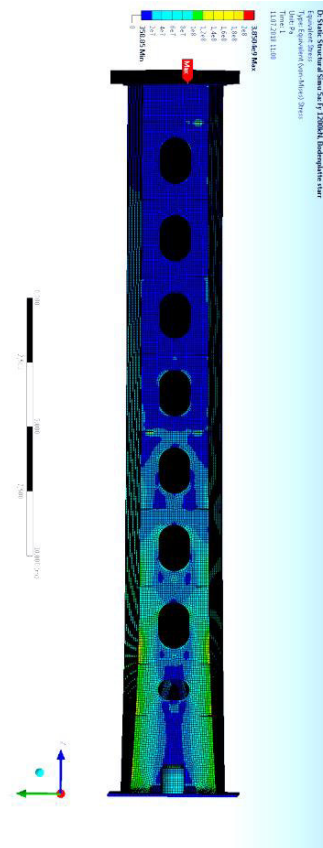


Abb. 20: Vertikales vorderes Schott des Hinterkastens

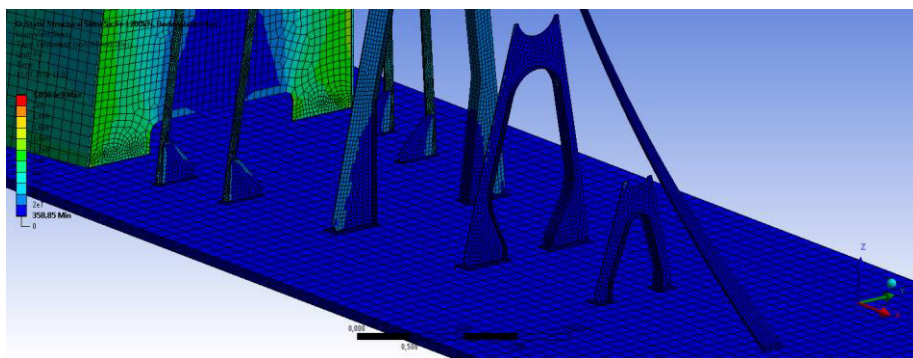


Abb. 21: Innere Struktur Hinterkasten

Der optimierte derzeitige Stand des Stahlbaus besitzt eine Gesamtmasse von **112 Tonnen** (Hinterkasten plus Rotor).

Dynamische Analyse

Da die Spannungen aus statischer Extremlast in der jetzigen Struktur kleiner 200 N/mm^2 betragen, ist für die dynamischen Lasten ein ermüdungs- bzw. dauerfestes Verhalten zu erwarten.

Dies gilt allerdings nur, wenn die Segelmaschine nicht dauerhaft in Resonanzbereichen betrieben wird. Um das auszuschließen ist es erforderlich, kritische Resonanzdrehzahlen zu bestimmen und diese Drehzahlen im Segelbetrieb zu vermeiden.

Hierfür wurden mit dem vorhandenen FEM Modell Modalanalyse-Berechnungen durchgeführt.

Die folgenden Eigenfrequenzen wurden ermittelt:

- | | |
|---|--|
| 1. Biegeeigenfrequenz in Schiff <u>qu</u> errichtung | = 1.88 Hz für elastische Einspannung
= 2.20 Hz für starre Einspannung |
| 1. Biegeeigenfrequenz in Schiff <u>l</u> ängsrichtung | = 2.3 Hz für elastische Einspannung
= 2.65 Hz für starre Einspannung |

Das bedeutet, daß in der realen Ausführung der Segelmaschine je nach erreichter Einspannsteifigkeit Resonanzen im Frequenzbereich 1.88 bis 2.65 Hz zu erwarten sind.

Da diese Eigenfrequenzen von der Geometrie, dem Werkstoff und der Massenverteilung abhängen, sind sie kaum veränderbar.

Um Materialermüdung im Betrieb aus unzulässigen Schwingungen und daraus resultierende erhöhte Lagerbelastungen zu vermeiden, muss mit Hilfe der Automation der Rotor-Drehzahlbereich **110 rpm bis 160 rpm** möglichst schnell durchfahren werden. Außerdem sollte eine möglichst hohe Wuchtgüte mit kleiner +/- 2 kg statisch erreicht werden.

Grundsätzlich wird die Eigenfrequenzproblematik als unkritisch bewertet, zumal sie im unteren Drehzahlbereich liegt, welcher bei wenig Wind durchfahren wird und permanenten Betrieb hier leicht vermeidbar ist.

Ähnliche Resonanz-Problematiken sind von anderen bereits gebauten Flettner- Rotoren bekannt und von daher nicht ungewöhnlich. Ein sorgfältiger Umgang mit dieser Eigenschaft in der Betriebsführung sichert den langfristigen unproblematischen Einsatz an Bord.

4.6. Fertigungszeichnungen und Stücklisten

Nachdem die FEM Berechnungen soweit abgeschlossen und damit die Bauteil-Geometrien festgelegt waren, wurde eine Vielzahl von Fertigungszeichnungen als 2D-Ausführung aus dem 3D CAD Modell abgeleitet.

Die Explosionszeichnung in Abbildung 22 zeigt die Vielzahl der Zeichnungen, welche im Rahmen dieses Berichtes nur beispielhaft gezeigt werden können.

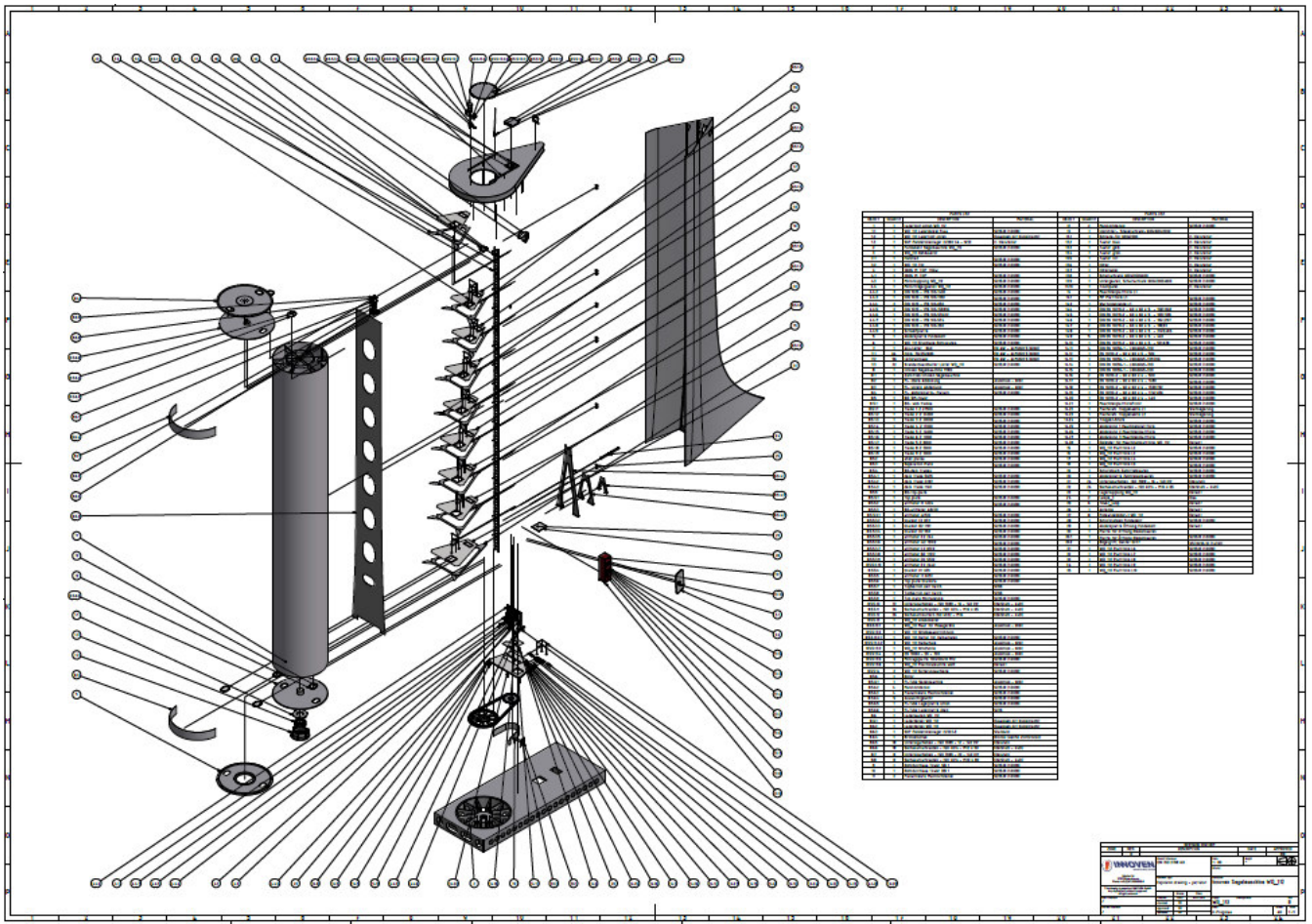


Abb. 22: Explosionszeichnung der Segelmaschine

Als Beispiel für Einzelzeichnungen sind im Folgenden die der Endscheibe gezeigt.

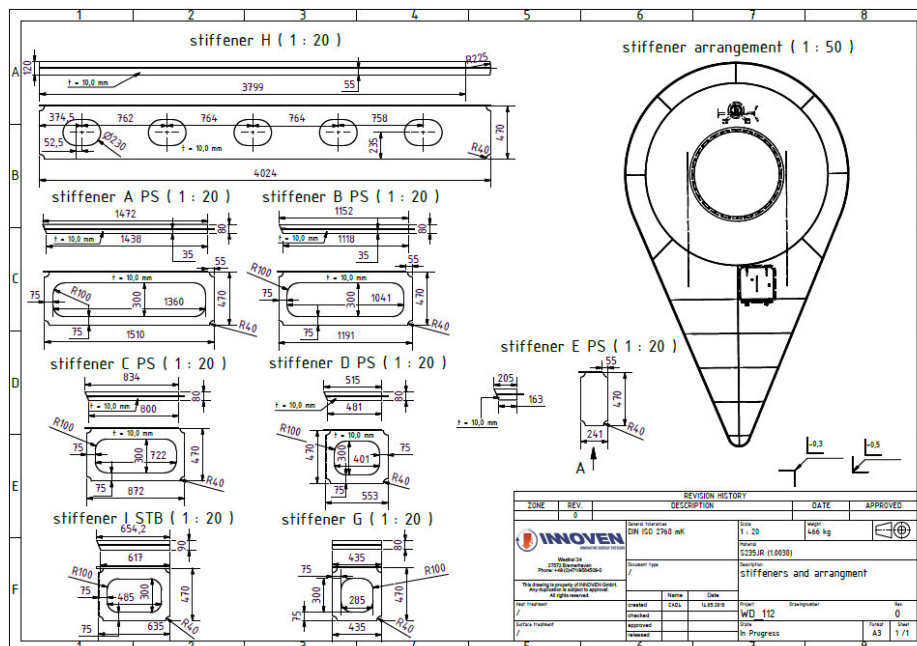
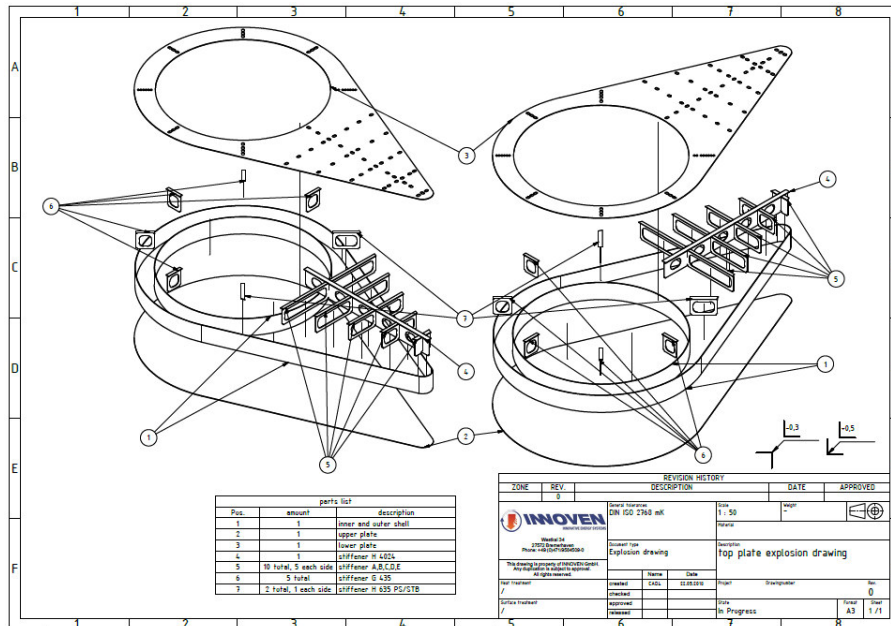


Abb. 23a + b: Fertigungszeichnungen Endscheibe

Es wurde ein kompletter Satz Fertigungszeichnungen erstellt, die hier im Rahmen des Abschlussberichtes aus Gründen der Geheimhaltung allerdings nicht gezeigt werden.

Ein Beispiel für die erstellten Stücklisten findet sich in Abbildung 25:

PARTS List WD 112 Segelrotor 2018

PARTS LIST			
OBJECT	QUANTITY	DESCRIPTION	MATERIAL
1	1	Lagertopf unten WD_112	
1.1	1	WD_112 Lagerdeckel Fuss	S235JR (1.0038)
1.2	1	WD_112 Lagertopf unten	Gusseisen mit Kugelgraphit
1.3	1	SKF Pendelrollenlager 22380 CA - W33	lt. Hersteller
2	1	Fundament Segelmaschine WD_112	S235JR (1.0038)
3	1	WD_112 Gehäusetür	
3.1	1	Handrad	S235JR (1.0038)
3.2	1	WD_112 Tür	S235JR (1.0038)
4	1	280S_M_TOP_110kw	
4.1	1	280S_M_TOP	S235JR (1.0038)
4.3	1	Motorkupplung WD_112	S235JR (1.0038)
4.4	1	Motorträgergestell WD_112	S235JR (1.0038)
4.4.2	3	DIN 1025 - IPB 100-1400	S235JR (1.0038)
4.4.3	1	DIN 1025 - IPB 100-1180	S235JR (1.0038)
4.4.4	2	DIN 1025 - IPB 100-650	S235JR (1.0038)
4.4.5	2	DIN 1025 - IPB 100-158,816	S235JR (1.0038)
4.4.6	1	DIN 1025 - IPB 100-576,02	S235JR (1.0038)
4.4.7	1	DIN 1025 - IPB 100-574	S235JR (1.0038)
4.4.8	1	DIN 1025 - IPB 100-350	S235JR (1.0038)
4.4.9	2	Schweißplatte	S235JR (1.0038)
5	1	Abdeckplatte Fundament	S235JR (1.0038)
6	1	WD_112 Grundlage Rohrsystem	S235JR (1.0038)
7	1	Alu-Leiter_840	EN AW - AlMgSi0,5 (6060)
7.1	64	Holm_72x25x1680	EN AW - AlMgSi0,5 (6060)
7.2	96	Leitersprosse	EN AW - AlMgSi0,5 (6060)
7.3	32	Standardwandhalter Leiter WD_112	S235JR (1.0038)
8	1	Innoven Segelmaschine V18D	
8.1	1	Zahntrieb Innoven Segelmaschine	
8.2	1	Fl- obere Abdeckung	Aluminium - 6061
8.3	1	Fl- untere Abdeckung	Aluminium - 6061
8.4	1	Fl- Abdeckplatte- Flansch	S235JR (1.0038)
8.5	1	BG_SM-tower	
8.5.1	1	BG- web frames	
8.5.1.1	1	frame 1 Z 27500	S235JR (1.0038)
8.5.1.2	1	frame 2 Z 24500	S235JR (1.0038)
8.5.1.3	1	frame 3 Z 20000	S235JR (1.0038)
8.5.1.4	1	frame 4 Z 17000	S235JR (1.0038)
8.5.1.5	1	frame 5 Z 14000	S235JR (1.0038)
8.5.1.6	1	frame 6 Z 11000	S235JR (1.0038)
8.5.1.7	1	frame 5 Z 8000	S235JR (1.0038)
8.5.1.8	1	frame 8 Z 5000	S235JR (1.0038)
8.5.1.9	1	frame 9 Z 3000	S235JR (1.0038)
8.5.2	1	shell plates	S235JR (1.0038)
8.5.3	1	Seperation Plate	S235JR (1.0038)
8.5.4	1	BG-deck frames	
8.5.4.1	1	deck frame 5675	S235JR (1.0038)
8.5.4.2	1	deck frame 2297	S235JR (1.0038)
8.5.4.3	1	deck frame 1140	S235JR (1.0038)

Abb. 24: Beispiel Stückliste

5. Planung Prototyp-Teststand

Wie schon weiter oben beschrieben ist nach dem Bau des Prototyps dessen Erprobung in einer Testumgebung unerlässlich, bevor der erste Einbau an Bord eines Seeschiffes erfolgen kann. Hierbei werden die Erprobung der Antriebstechnologie, die Lagerung, das Schwingungsverhalten, Geräuschemissionen und die Software-Entwicklung für die Automation im Mittelpunkt stehen. Zusätzlich werden die Teststandmessungen und Erprobung der sicherheitsrelevanten Einrichtungen für die Zertifizierung mit der Schiffs-Klassifikationsgesellschaft verwendet.

Der Testplatz selbst kann recht einfach gestaltet werden, da die Segelmaschine auf einer vorgefertigten Stahl-Fundamentsektion aufgebaut und später auch so zur Werft geliefert und im Schiffskörper eingebaut wird. Diese Lösung hat sich im Laufe des Projektes als die wirtschaftlichste Variante erwiesen, da Anpassungsarbeiten am Schiff zum Einbau einer Segelmaschine (heißt Fundamentbau an Bord) aufwändig und damit teuer sind. Somit wurde im Rahmen der Konstruktionsarbeiten auch die Fundamentsektion mitberechnet, die nun gleichzeitig auch als Fundament für den Teststand dient.

Diese Fundament-Sektion sollte für den Teststand z.B. auf einer ebenen Schwerlast-Betonplatte befestigt werden. Hierfür ist eine tragfähige Verankerung und Verschraubung zwischen Betonplatte und Stahlfundament vorzusehen. Zusätzlich könnte der Hinterkasten mit Drahtseilen zur Sicherheit gegen Kippen temporär abgespannt werden.

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen als Beispiel so einen Testaufbau wie er auf dem INNOVEN Firmengelände auf der vorhandenen Schwerlastplatte aufgebaut werden könnte.



Abb. 25: INNOVEN Firmengelände mit möglichem Teststands-Stellplatz

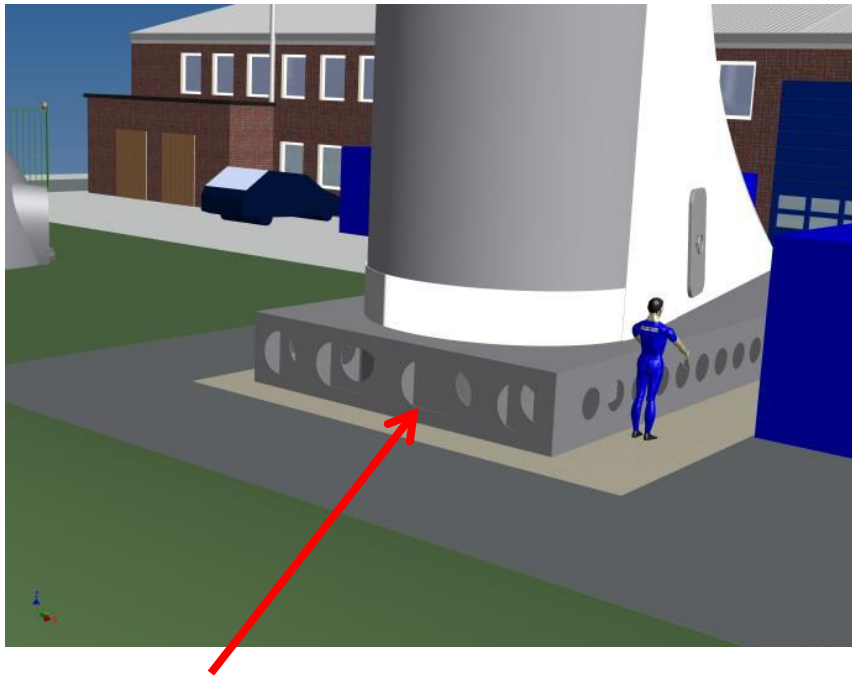


Abb. 26: Fundament-Sektion der Segelmaschine = Teststandsfundament

Der Messaufbau kann ebenfalls einfach ausgeführt werden, da hier ja keine Grundsatzuntersuchungen zur Aerodynamik mehr durchgeführt werden. Das heißt, es wird kein externer Windmessmast erforderlich, sondern es wird die Windmesstechnik auf dem Geräteträger der Segelmaschine wie später im Einsatz an Bord genutzt.

Testprozeduren

Alle Sensoren, die später im Bordbetrieb durch die Automation erfasst werden, werden auch auf dem Teststand abgefragt.

Hierzu zählen

- Erfassung der **Lagertemperaturen** oben und unten
- alle relevanten Daten des **Umrichters** wie Eingangs- und Ausgangsspannung, Strom, Temperatur etc.
- alle relevanten Daten des **Antriebsmotors** wie Eingangsleistung, Rotordrehzahl usw.

Zusätzlich zu diesen Standardmessgrößen sollten auf dem Teststand noch die folgenden Sensoren installiert werden:

- **Luftschallmessung** im gesamten Drehzahlbereich nahe am Rotor und in relevanter Entfernung von z.B. 10 - 20 m
- Beschleunigungsaufnehmer in drei Höhen in x- und y-Richtung zur Erfassung des **Schwingungsverhaltens**

- **Dehnungsmessungen** nahe der Einspannung am Hinterkasten und anderen signifikanten Stellen zum Abgleich mit FEM Modell

Zunächst sollen ausführliche interne Untersuchungen eventuelle Schwachstellen aufdecken und die Fertigstellung der Automationssoftware ermöglichen.

Dazu sollte der Rotor eine Betriebszeit auf dem Teststand von ca. 1.000 Stunden absolvieren. Dadurch können dann auch beim Abbau Teile des Antriebs und der Lagerung auf Verschleiß beurteilt werden.

Die Testprozedur zur **Zertifizierung** orientiert sich an den Anforderungen eines Teststandslaufs für einen Schiffsmotor, heisst

- mindestens 60 min 100% Leistung / volle Drehzahl zur Bestimmung des Wärmeverhaltens und
- 30 min 110% als Extremtest

Da es derzeit noch keine veröffentlichten Richtlinien für die Zertifizierung von automatisierten Segelantrieben auf Frachtschiffen gibt, beschränkt sich der Zertifizierungsumfang derzeit auf die Überprüfung der

- mechanischen Eigenschaften wie Lasten, Festigkeitsrechnung, und den Nachweis durch Dehnungsmessungen
- elektrischen Eigenschaften der Antriebseinheit (nach z.B. DNV/GL Klassifikations- und Bauvorschriften / VI Ergänzende Vorschriften und Richtlinien / 7 Richtlinien für die Durchführung von Baumusterprüfungen)
- Tests zur Demonstration der Funktionsweise der Sicherheitsabschaltung

Der Test kann beendet werden, wenn Automation und Sicherheits-Einrichtungen nachweislich einen sicheren Schiffsbetrieb ermöglichen und die Klassifikation die entsprechenden Zertifikate erstellt hat.

Danach wäre es wünschenswert möglichst schnell in den realen Schiffseinsatz zu gelangen, um die Maschine weiter zu optimieren.

6. Kosten Ermittlung / Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in zwei Teile gegliedert:

Als Erstes werden die Kosten für eine Segelmaschine abgeschätzt. Danach wird die Einsparung an Treibstoff, die mit einer Segelmaschine erreicht werden kann, möglichst realistisch berechnet. Aus den beiden Zahlen wird die Wirtschaftlichkeit bestimmt bzw. die Zeiten für den sog. „Return of Investment“.

Zunächst zur Kostenabschätzung:

Die Segelmaschine besteht größtenteils aus 112 Tonnen einfachem Stahlbau, welcher zunächst mit europäischer Fertigung und damit mit 6 bis 8 € gerechnet wurde.

Allerdings sollte die Fertigung möglichst schnell zum Serienbau in Asien gebracht werden, weil erst dann das Preisniveau akzeptabel wird, wie unten ersichtlich. In einer Serie mit z.B. 100 Maschinen pro Jahr erscheinen hier 3 bis 4 € pro kg realistisch möglich. Dann ergeben sich für Klein-Serienbau die folgenden Zahlen:

Kosten Stahlbau (3,5 €/kg)	392.000 €
Umrichter	15.000 €
Automation und Sensorik	30.000 €
Antrieb	30.000 €
Lagerung mit Schmierung	40.000 €
Einbau Werft	10.000 €
Kleinteile, Lampen etc.	3.000 €
Summe Kosten für eine WD 100	520.000 €

Nun zur Berechnung des „Ertrages“ in Form von Treibstoff-Einsparung. Hierfür wird zunächst für **eine** Segelmaschine die **Äquivalente Diesel Dauerleistung** berechnet. Hierbei werden die folgenden Annahmen festgelegt:

- Mittlere Jahresgeschwindigkeit: 8.5 m/s in Weibull Verteilung als realistischer Mittelwert für die befahrenen Seegebiete.
- Alle Windrichtungen an Bord gleichmäßig verteilt, heißt es gibt keine bevorzugte Richtung zum Wind, in der das Schiff fährt.
- Für die Treibstoffersparnis werden die wahren Windgeschwindigkeiten von 8 m/s bis 14 m/s berechnet, welche nach Weibull Verteilung 50 % der Zeit abdecken (siehe hierzu Abbildung 27).
- Die Windgeschwindigkeiten unterhalb 8 m/s bringen nur geringe Treibstoff-einsparungen, ebenso wie die Windgeschwindigkeiten oberhalb 14 m/s, die selten auftreten. Deshalb wird die Treibstoffersparnis dieser beiden Bereiche pauschal mit 10 % der Treibstoffersparnis aus 8 bis 14 m/s bewertet.
- Die Schiffsgeschwindigkeit wird mit konstant 15 Knoten gerechnet.

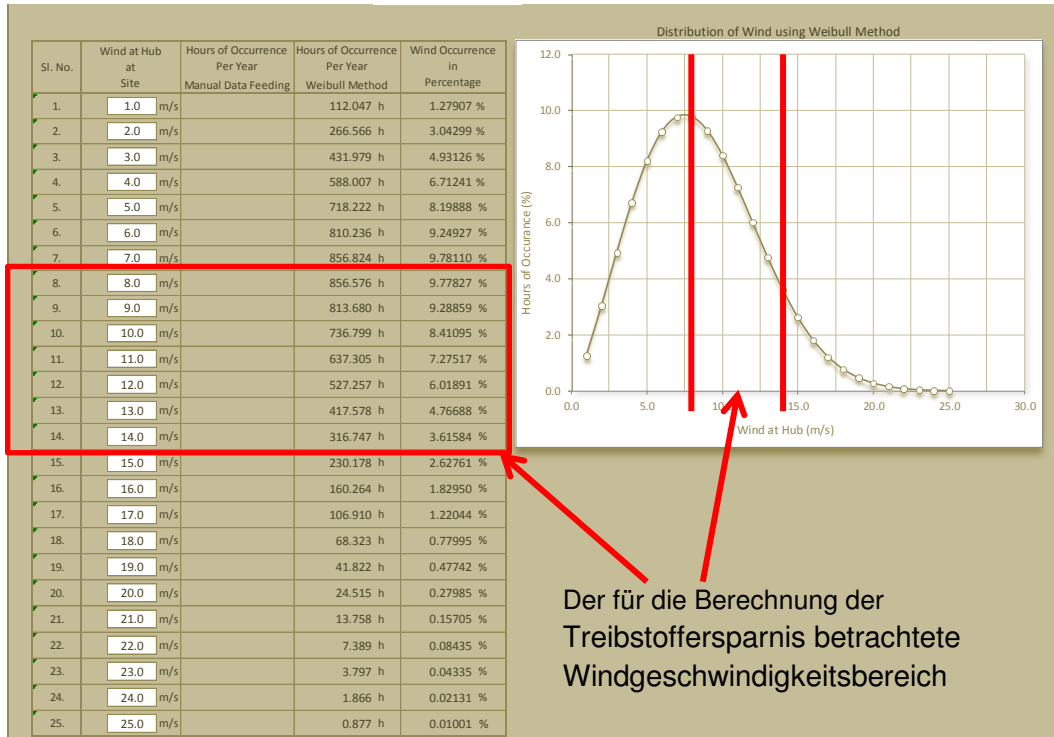


Abb. 27: Windverteilung und betrachteter Windgeschwindigkeitsbereich

Mit einem speziell entwickelten Excel Tool in dem u.a. die Segeleigenschaften, der Eigenverbrauch der Segelmaschine usw. berücksichtigt sind, wird eine mittlere effektive Leistungseinsparung des Schiffes berechnet. Die folgende Abbildung zeigt einen Auszug aus dem Berechnungstool.

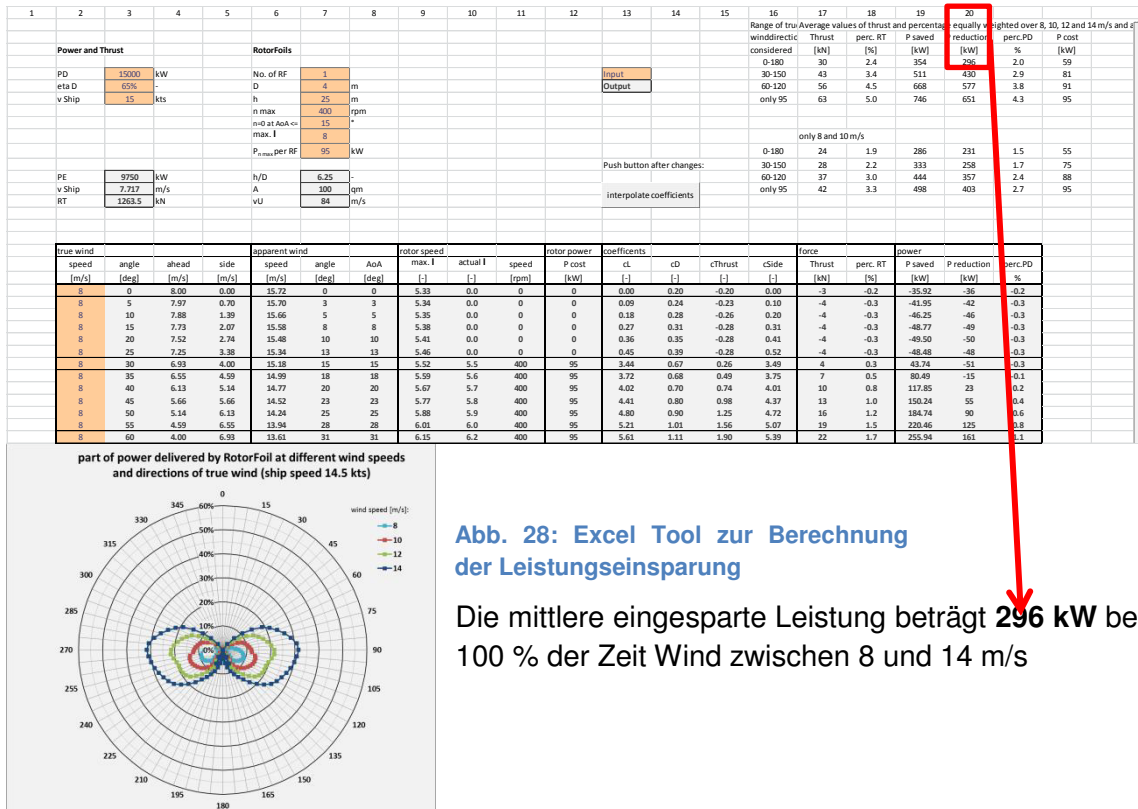


Abb. 28: Excel Tool zur Berechnung der Leistungseinsparung

Die mittlere eingesparte Leistung beträgt **296 kW** bei 100 % der Zeit Wind zwischen 8 und 14 m/s

Da diese Windgeschwindigkeiten jedoch nur zu 50 % der Zeit vorkommen beträgt die tatsächliche mittlere eingesparte Leistung $0.5 * 296 = 148 \text{ kW}$.

Wie oben beschrieben, werden für die restlichen Zeiten und Windgeschwindigkeiten 10 % pauschal aufgerechnet, so daß die

mittlere eingesparte Leistung = Äquivalente Diesel Dauerleistung $148 \text{ kW} * 1,1 = \mathbf{162,8 \text{ kW}}$

entspricht.

Zum Verständnis:

die 162,8 kW werden durch eine WD100 Segelmaschine im Mittel dauernd, wenn das Schiff mit 15 Knoten fährt eingespart und müssen dann nicht mehr als Dieselleistung zur Verfügung gestellt werden.

Der Wert bezieht sich außerdem auf die eher mittelmäßigen Windannahmen wie oben festgelegt. Das heißt, wenn das Schiff in windreicheren Gebieten mit günstiger Route zum Wind - also hauptsächlich seitlichen Windrichtungen - fährt, ist die Äquivalente Diesel Dauerleistung deutlich höher als 162,8 kW.

Genauso wird der Wert deutlich niedriger ausfallen, wenn das Schiff nur in windschwachen Gebieten unterwegs ist.

Die eingesparte Treibstoffmenge wird nun wie folgt gerechnet:

$162,8 \text{ kW} * 0,19 \text{ kg/kWh} * 24 \text{ h} * 320 \text{ Seetage/a} = 237.558 \text{ kg}$, also **237,6 tons /a**

In Euro bedeutet das mit heutigen Bunkerpreisen in Rotterdam:

Destillat Marine Gasoil = 554,9 €/t = **Einsparung 131.844 €/a**

Schweröl IFO 380 = 368,5 €/t = **Einsparung 87.556 €/a**

Die Amortisationszeiten für die Investition stellen sich also wie folgt dar:

Bunkerpreis aktuell = 554,9 €/t → Amortisationszeit = 3.9 Jahre für MGO

= 368,5 €/t → Amortisationszeit = 5.9 Jahre für Schweröl IFO 380

Oder in der folgenden Grafik etwas allgemeiner dargestellt, die Abhängigkeit der Amortisationszeit von der Bunkerpreis Entwicklung:

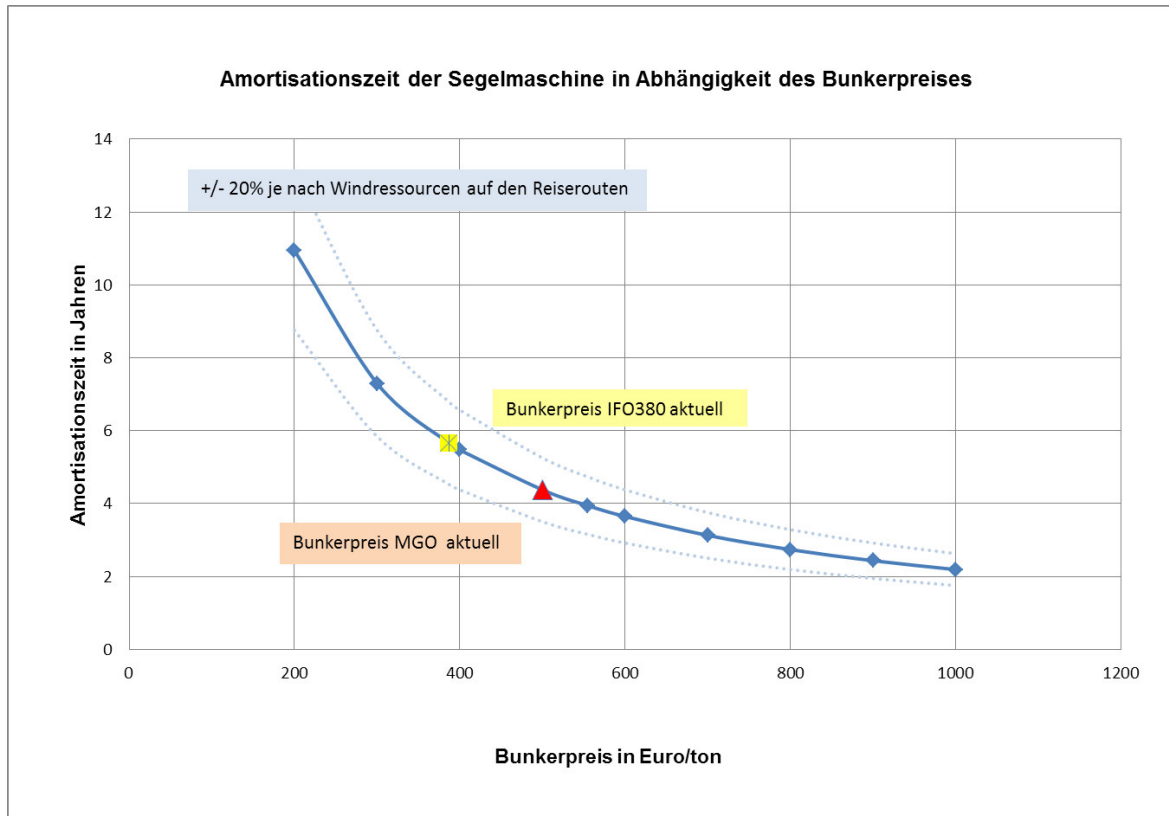


Abb. 29: Amortisationszeit für eine Segelmaschine in Abhängigkeit des Bunkerpreises

7. Fazit

Mit Hilfe der im Rahmen des vorliegenden Projektes erstellten Konstruktionsdaten wurde erstmalig eine wirtschaftliche Bewertung für den Bau und den Einsatz einer Segelmaschine vom Typ WD 100 ermöglicht.

Ebenfalls wurden damit die Grundlagen für die Errichtung eines Prototyps geschaffen.

Die Rahmenbedingungen in der maritimen Branche sind ebenfalls sehr günstig, da aktuell die Bunkerpreise wieder anziehen und das Thema Nachhaltigkeit in der Schifffahrt massiv an Bedeutung gewinnt (siehe unten), während es an machbaren Lösungen mangelt.

Es ist also der richtige Zeitpunkt, um anzufangen!

Im Vergleich zu den erheblichen Investitionskosten für die Umrüstungen auf den Treibstoff LNG oder dem Einbau von Scrubbern, bietet die Segelmaschine eine kosteneffektive Alternative zur Reduzierung der Schiffsemissionen.

So kann ein Schiff mit einem leistungsfähigen Windzusatzantrieb ausgerüstet werden, die eingesparten Treibstoffkosten werden verwendet für die Umstellung von Schweröl auf Destillate wie MGO. Damit werden nicht nur Schwefel Emissionen vermieden sondern auch die CO₂ Bilanz verbessert sich aufgrund der eingesparten Treibstoffmenge. Wartungskosten an den vorher mit Schweröl betriebene Dieselmotoren werden ebenfalls verringert.

Abwärme aus dem Abgaskessel wird nicht mehr zur Vorwärmung von Schweröl verbraucht, sondern kann anderweitig im Schiffsbetrieb verwendet werden um die Gesamt-Energiebilanz zu verbessern.



(THB Nr. 181, 2018)