

INNOVEN GMBH
Westkai 34
27572 Bremerhaven

Grundlagenuntersuchung zur Optimierung von Segelrotoren (Flettner-Rotoren) für den Antrieb von Schiffen

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem Az: 29668 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Dipl.-Ing. Rolf Rohden

Bremerhaven, Juli 2014

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	29668	Referat	24	Fördersumme	125.000 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung von Segelrotoren (Flettner-Rotoren) für den Antrieb von Schiffen**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	22.06.2012	31.12.2013	

Zwischenberichte nach Absprache

Bewilligungsempfänger INNOVEN GmbH Westkai 34 27572 Bremerhaven info@innoven.de	Tel	0471 / 958 45 090
	Fax	0471 / 958 45 099
	Projektleitung	
	Dipl.-Ing. Rolf Rohden	
		Bearbeiter
		Dipl.-Ing. Rolf Rohden

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Neben den negativen Effekten der durch den Seetransport verursachten Emissionen (je nach Studie kommen 2-4% der weltweiten CO₂-Emissionen aus der Schifffahrt) sind die jetzt schon hohen und in den nächsten Jahren weiter steigenden Brennstoffkosten ein wesentlicher Faktor in den Betriebskosten der Schifffahrtsbranche. Verglichen mit anderen Transportfahrzeugen sind Schiffe jedoch pro transportierter Tonne immer noch die umweltfreundlichsten Transportmittel und aus heutiger Sicht für lange Transportstrecken und große Transportmengen unverzichtbar. Dennoch ist unbestritten, dass die Schadstoffemissionen der Schiffe zur Luftverschmutzung und dem Klimawandel beitragen.

Alternative Antriebe auf Basis erneuerbarer Energien können hier einen wesentlichen Beitrag zur Brennstoffeinsparung und damit zur CO₂- und Schadstoffreduzierung leisten, zumal ein Großteil der Schiffe immer noch das stark schwefelhaltige Schweröl einsetzt, sofern die Richtlinien der Länder oder der Schifffahrtsorganisation IMO nicht für bestimmte Seegebiete (z.B. Nord- und Ostsee) andere Brennstoffe (Marine Diesel Oil MDO oder Marine Gas Oil MGO) fordern.

Heute verwendete Segelrotoren basieren jedoch im Prinzip auf der Rotortechnologie des Herrn Flettner aus den 1920er Jahren. Hier bietet sich noch viel Raum für Optimierungen, die im Rahmen dieses Projektes untersucht und messtechnisch nachgewiesen werden sollen, um als Basis für die Entwicklung einer neuartigen, innovativen Segelmaschine zu dienen.

Hauptziel ist die Verbesserung der „Am Wind – Eigenschaften“ des Segelrotors.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Arbeitspaket 1 Grundlagen

Zunächst wurde eine Konzeptstudie für die neue Segelmaschine durchgeführt, bei der verschiedene Varianten miteinander verglichen werden. Die Ideen der Antragsteller zur Verbesserung der Segelrotoren wurden hierbei kritisch hinterfragt und miteinander verglichen.

Aus dieser Konzeptstudie wurden Varianten ausgewählt, die dann mit aerodynamischen Berechnungen mittels CFD die Basis für den Bau eines Funktionsmodells mit Variationsmöglichkeiten lieferten. Dieses wurde anschließend im Windkanal hinsichtlich u.a. Effizienz und Stabilität messtechnisch anhand von Modellen untersucht.

Arbeitspaket 2 Basic Design

Mit den im Windkanal erhaltenen Ergebnissen wurde für das beste Konzept eine konstruktive Auslegung eines realen Segelrotors für die Anwendung auf Seeschiffen durchgeführt. Dazu gehörten neben der Materialauswahl eine Lastenberechnung sowie die eigentliche Konstruktion (Basic Design).

Arbeitspaket 3 Vergleich

Parallel dazu wurde ein qualitativer und quantitativer Vergleich zum klassischen Segelrotor hinsichtlich u.a. Wirkungsgrad, Handling, Konstruktion etc. durchgeführt, um die Vorteile der neuen Segelmaschine bewerten zu können.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projektes wurde mit Hilfe theoretischer Berechnungen und praktischer Erprobung von Modellen erstmals eine optimale Segeltechnologie als Windzusatzantrieb für die Treibstoffeinsparung in der Seeschifffahrt entwickelt.

Die Hauptvorteile dieser neuen Segeltechnologie im Vergleich zu bekannten Systemen sind:

1. Treibstoffeinsparungen bei Am Wind Kursen ab 40 Grad, dabei um 50% geringere Antriebsleistung als ein klassischer Flettner-Rotor. Mit dem Rotorprofil ist bei gleichen Windverhältnissen bis zu 30% mehr Brennstoffeinsparung möglich, als mit einem Flettner-Rotor.
2. Vollständige Automatisierbarkeit, keinen zusätzlicher Personaleinsatz erforderlich (Crew).
3. Erforderliche Segelfläche = ca. 25 % der Fläche von Tuchsegeln bei gleichem Leistungspotenzial.
4. Keine Beeinträchtigung der Schiffssicherheit. In kritischen Situationen genügt eine Unterbrechung der Stromzufuhr zum Segelsystem um das Schiff in einen sicheren Zustand zu bringen.
5. Geringer Wartungsaufwand
6. Sehr gute Integrierbarkeit in den Schiffskörper und gleichzeitige Nutzung für Schiffssysteme.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das entwickelte Segelsystem für bestimmte Schiffstypen, die eine möglichst freie Anströmung der Rotorprofile erlauben, neben den Vorteilen im täglichen Schiffsbetrieb ein deutlich verbessertes Potential an Brennstoffeinsparung im Vergleich zu allen bekannten Segelsystemen bietet.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Bisher wurden die Projektergebnisse außer im Rahmen verschiedener Firmenpräsentation der INNOVEN GmbH noch nicht großflächig veröffentlicht.

Hintergrund ist, dass die Projektergebnisse direkt in innovative Schiffsentwürfe eingeflossen sind, die derzeit mit Investoren und Werften verhandelt und zu gegebener Zeit der Öffentlichkeit vorgestellt werden (Fachzeitschriften, Schiffbaumesse SMM etc.). Ziel ist dabei, mit den geplanten Schiffen einen Technologievorsprung zu behalten.

Bei der Präsentation des Unternehmens INNOVEN GmbH in der Endrunde der Entscheidung für den Deutschen Gründerpreis im Mai 2013 wurde das vorliegende Projekt ausführlich erläutert und hat sicherlich dazu beigetragen, dass die INNOVEN GmbH den Preis in der Kategorie „Start-up“ gewonnen hat.

Fazit

Im Rahmen dieses Förderprojektes konnten die Grundlagen für eine zukunftsweisende Segeltechnologie in der kommerziellen Seeschifffahrt erarbeitet werden.

Es wurden verschiedene Schiffsvorentwürfe entwickelt, welche diese neue Segeltechnologie nutzen könnten. Unabhängig davon ob derartige Projekte zeitnah umgesetzt werden können, halten wir es für sehr notwendig die praktische Erprobung dieser neuen Segeltechnologie in realer Größe voranzutreiben. Aufgrund der wirtschaftlichen Vorteile gegenüber bekannten Segelsystemen könnte sich hieraus ein weitverbreitetes Produkt für die kommerzielle See-Schifffahrt entwickeln.

Inhalt

1. EINLEITUNG	5
2. GRUNDLAGEN	5
3. CFD BERECHNUNGEN UND DEREN ERGEBNISSE.....	10
4. KONSTRUKTION UND BAU DES WINDKANAL MODELLS	14
5. PLANUNG, DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE DER WINDKANALMESSUNGEN	17
6. VERGLEICH DER NEU ENTWICKELTEN SEGELTECHNOLOGIE MIT DEM KLASSISCHEN FLETTNER ROTOR.....	21
7. BASIC DESIGN EINES MÖGLICHEN PROTOTYPEN FÜR REALE ANWENDUNG	24
8. ANWENDUNGSBEISPIELE MIT VERSCHIEDENEN INNOVATIVEN SCHIFFSENTWÜRFEN	26
9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptmenü des INNOVEN Berechnungstools für Windzusatzantriebe	6
Abbildung 2: Begriffsdefinition	7
Abbildung 3: Annahmen für die statistische Auswertung	8
Abbildung 4: Ergebnis der statistischen Auswertung für eine Schiffsgeschwindigkeit von 10 kn und 15 kn.....	8
Abbildung 5: Faktor für mittlere Flächeneffektivität bei 15 kn Schiffsgeschwindigkeit gegenüber Hochsegel	9
Abbildung 6: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse	9
Abbildung 7: Beispiele für Strömungsberechnungen	11
Abbildung 8: Auftriebsbeiwerte des Rotorprofils für verschiedene Streckungsverhältnisse...12	
Abbildung 9: Widerstandsbeiwerte des Rotorprofils für verschiedene Streckungsverhältnisse	13
Abbildung 10: Schubbeiwerte für drehbares und fest stehendes Rotorprofil	14
Abbildung 11: Windkanalmodell „Rotor 1“ (Flettner-Rotor)	15
Abbildung 12: Windkanalmodell "Rotor 2" (Rotorprofil kurz)	16
Abbildung 13: Windkanalmodell "Rotor 3" (Rotorprofil lang)	16
Abbildung 14: Einzelteile der Windkanalmodelle	17
Abbildung 15: Rotormodell 1 (Flettner-Rotor zur Kalibrierung).....	18
Abbildung 16: Rotormodell 2, Rotorprofil kleines Streckungsverhältnis (1:5)	18
Abbildung 17: Messergebnisse Auftriebsbeiwert Rotorprofil kurz	19
Abbildung 18: Messergebnisse Widerstandsbeiwert Rotorprofil kurz.....	19
Abbildung 19: Rotormodell 3, Rotorprofil großes Streckungsverhältnis (1:10)	20
Abbildung 20: Messergebnisse Auftriebsbeiwert Rotorprofil lang	20
Abbildung 21: Messergebnisse Widerstandsbeiwert Rotorprofil lang.....	21
Abbildung 22: Berechnungsergebnis Brennstoffeinsparung Flettner-Rotor.....	23
Abbildung 23: Berechnungsergebnis Brennstoffeinsparung Rotorprofil	24
Abbildung 24: Basic design eines Rotorprofils.....	25
Abbildung 25: 3D-Ansicht eines Rotorprofils.....	26
Abbildung 26: Anwendungsbeispiel 1 (LEV TORNADO)	27
Abbildung 27: Anwendungsbeispiel 2 (Entwurf für einen innovativen Multipurpose Frachtsegler (INNOVEN)).....	28
Abbildung 28: Anwendungsbeispiel 3 (Entwürfe für innovative Segel-Kreuzfahrtschiffe Trimaran und Monohull-Entwurf (INNOVEN))	30
Abbildung 29: Anwendungsbeispiel 4 (Extremer Monohull-Entwurf mit speziell für den Segelbetrieb optimiertem Unterwasserschiff (INNOVEN))	30

1. Einleitung

Basierend auf einer Zahl von ca. 45.000 Seeschiffen größer 100 GT wurden in 2007 in der internationalen Transportschifffahrt jährlich zwischen 234 und 276 Millionen Tonnen Brennstoff verbraucht. Da die Zahl der Schiffsneubauten die Zahl der Abwrackungen in den vergangenen Jahren überstiegen hat, und die Menge der weltweit transportierten Güter via Seetransport stetig steigt, liegen diese Zahlen inzwischen deutlich höher.

Ein einzelnes Frachtschiff mit ca. 100m Länge benötigt pro Seetag etwa 30 to Brennstoff, bei angenommenen 300 Seetagen ergibt dies 90.000 to pro Jahr.

Daraus lässt sich erkennen, dass es auf diesem Gebiet ein enormes Einsparpotenzial gibt, das gleichzeitig zu einer deutlichen Reduzierung des Schadstoffausstosses führt.

Jede Massnahme zur Steigerung der Energieeffizienz auf Seeschiffen trägt direkt zur Umweltentlastung bei. Einen großen Anteil können Antriebe auf Basis erneuerbarer Energien leisten, im Speziellen Windantriebe.

Verschiedene alternative Antriebssysteme befinden sich in Deutschland bereits im Test (Segelrotorschiff E-Ship 1, Skysails, Dynarigg, Solarboote), um ihre Effizienz und Tauglichkeit im alltäglichen Schiffsbetrieb unter Beweis zu stellen.

Rein physikalisch betrachtet ist dabei das klassische Segelrotorsystem (Flettner) gemessen an der erzeugten Leistung pro Quadratmeter genutzter Fläche unbestritten das effizienteste System, um ein Schiff mit dem Wind anzutreiben.

Mit dem vorliegenden Projekt wurde – basierend auf den bisherigen Erkenntnissen – eine neue Generation von Segelrotoren, sog. Segelmaschinen, entwickelt, die eine erweiterte Nutzung und damit eine erhöhte Brennstoffeinsparung ermöglichen.

Ziel des Projektes war die Gewinnung neuer Erkenntnisse hinsichtlich der tatsächlich erreichbaren Effizienz von Segelrotoren und die Erbringung des rechnerischen und experimentellen Nachweises, dass es möglich ist, den klassischen Segelrotor erheblich zu verbessern.

2. Grundlagen

Zum Beginn des Projektes wurden zunächst Grundlagen erarbeitet wie Windzusatzantriebe auf modernen Schiffen möglichst praxisnah und objektiv bewertet werden können.

Zentraler Bestandteil war hier die Entwicklung eines Software-Tools zur Berechnung der mittleren Treibstoffersparnis für ein Schiff mit Windzusatzantrieb. Hier gehen zunächst die Kennwerte für das Schiff wie:

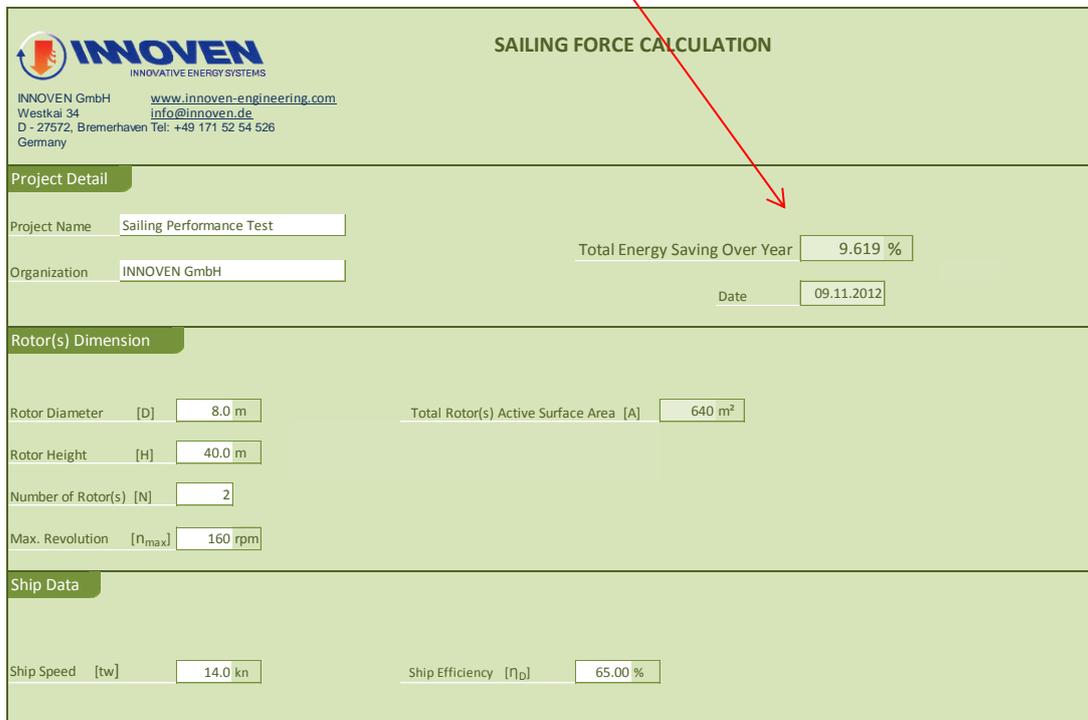
- mittlere Geschwindigkeit
- Schubbedarf für verschiedene Geschwindigkeiten (wind-und seegangsabhängig)
- usw. ein.

und dann noch zusätzlich die Beiwerte für den Segelantrieb und dessen evtl. Leistungsbedarf.

Anschliessend werden Werte für eine mittlere Jahreswindgeschwindigkeit mit einer Weibull-Häufigkeits-Verteilung festgelegt, wie es zum Beispiel für Energieertragsberechnungen in der Offshore-Windenergiebranche üblich ist. Diese Häufigkeitsverteilung der **wahren** Windgeschwindigkeiten wird aus allen Windrichtungen gleichmässig verteilt angenommen, d.h. es gibt keine Vorzugswindrichtung.

Diese gewählten Randbedingungen gelten für alle untersuchten Segelsysteme und erlauben deshalb einen direkten Vergleich hinsichtlich des Potenzials zur Treibstoffeinsparung.

Abbildung 1 zeigt das Hauptmenü des INNOVEN Berechnungstools für Windzusatzantriebe mit eingen der Eingabefelder und der Ergebnisanzeige für die mittlere Brennstoffeinsparung für ein Betriebsjahr:



INNOVEN
INNOVATIVE ENERGY SYSTEMS

INNOVEN GmbH www.innoven-engineering.com
Westkal 34 info@innoven.de
D - 27572, Bremerhaven Tel: +49 171 52 54 526
Germany

SAILING FORCE CALCULATION

Project Detail

Project Name Total Energy Saving Over Year
 Organization Date

Rotor(s) Dimension

Rotor Diameter [D] Total Rotor(s) Active Surface Area [A]
 Rotor Height [H]
 Number of Rotor(s) [N]
 Max. Revolution [n_{max}]

Ship Data

Ship Speed [tw] Ship Efficiency [η_p]

Abbildung 1: Hauptmenü des INNOVEN Berechnungstools für Windzusatzantriebe

Die folgende Abbildung 2 zeigt einige Skizzen zur Segel-Theorie und Begriffsdefinition:

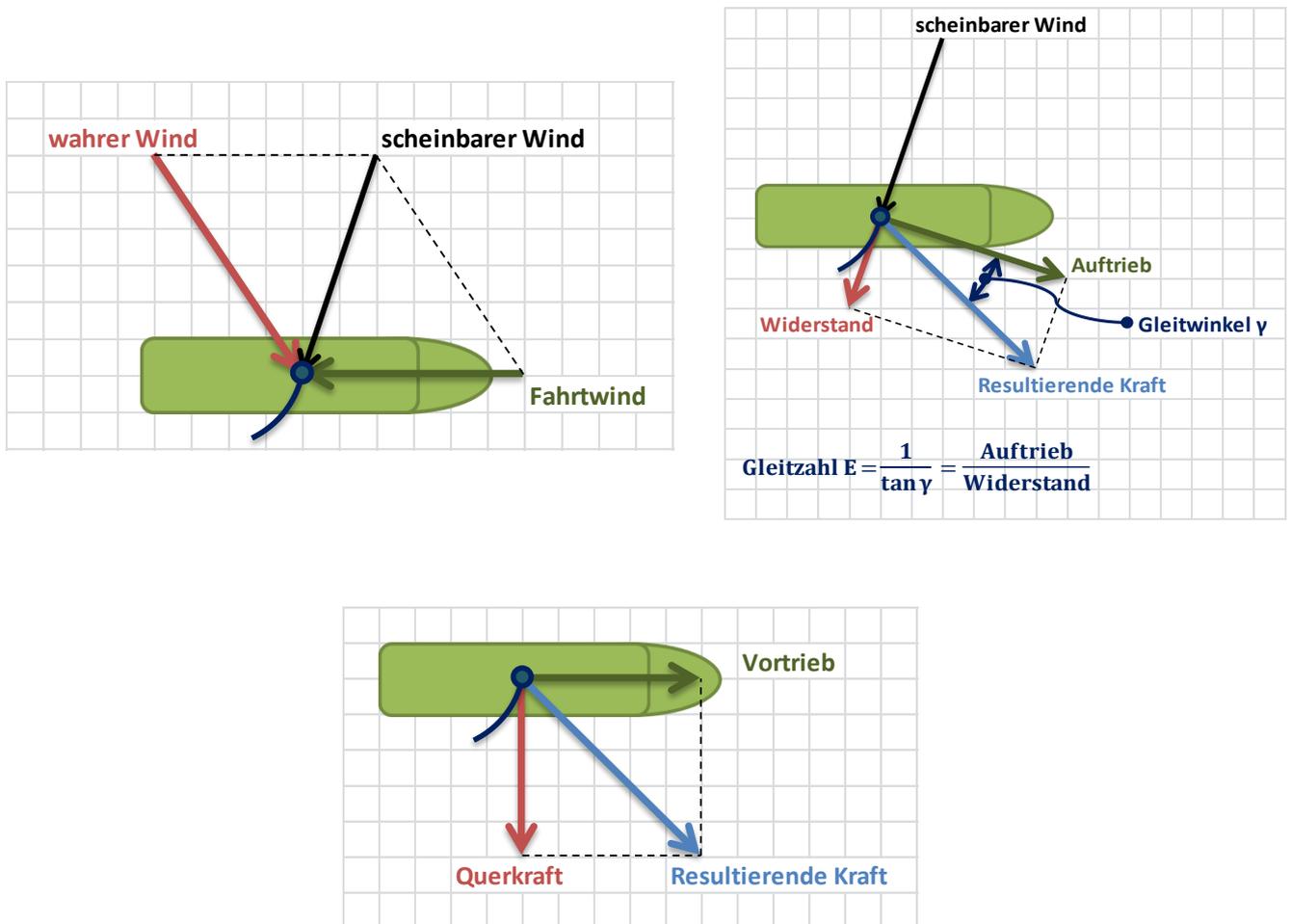
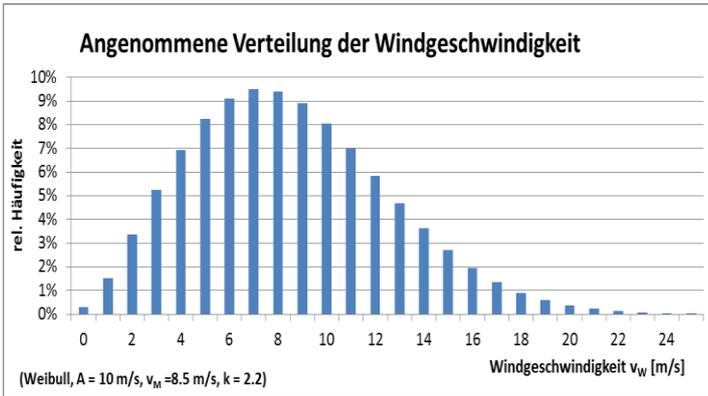


Abbildung 2: Begriffsdefinition

Für realistische Annahmen wie einer mittleren Schiffsgeschwindigkeit von 15 Knoten sowie einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von 8.5 m/s zeigen die Berechnungsergebnisse, daß die scheinbare Windrichtung an Deck **72 %** der Zeit aus einem Sektor von plus minus 60 Grad von vorne kommt. D.h. das größte Treibstoffeinsparpotenzial befindet sich in den so genannten „Am Wind-Kursen“, da diese statistisch am häufigsten vorkommen und sich hier die Fahrtwindgeschwindigkeit mit der wahren äußeren Windgeschwindigkeit **addiert**.

Daraus resultiert die Erkenntnis daß die Am Wind-Eigenschaften ein sehr wichtiges Bewertungskriterium für einen Windzusatzantrieb sind. Gute Segeleigenschaften bei Wind von hinten (Vor Wind-Kurse) dagegen sind kaum interessant weil dieser Zustand statistisch sehr selten vorkommt und sich dann die Fahrtwindgeschwindigkeit von der wahren äußeren Windgeschwindigkeit **subtrahiert**.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung finden sich in den folgenden Abbildungen 3 und 4:



Angenommene gleichmäßige Richtungsverteilung des wahren Windes

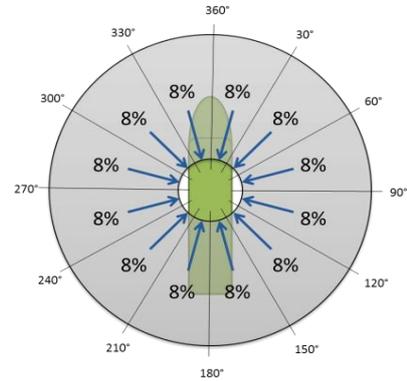


Abbildung 3: Annahmen für die statistische Auswertung

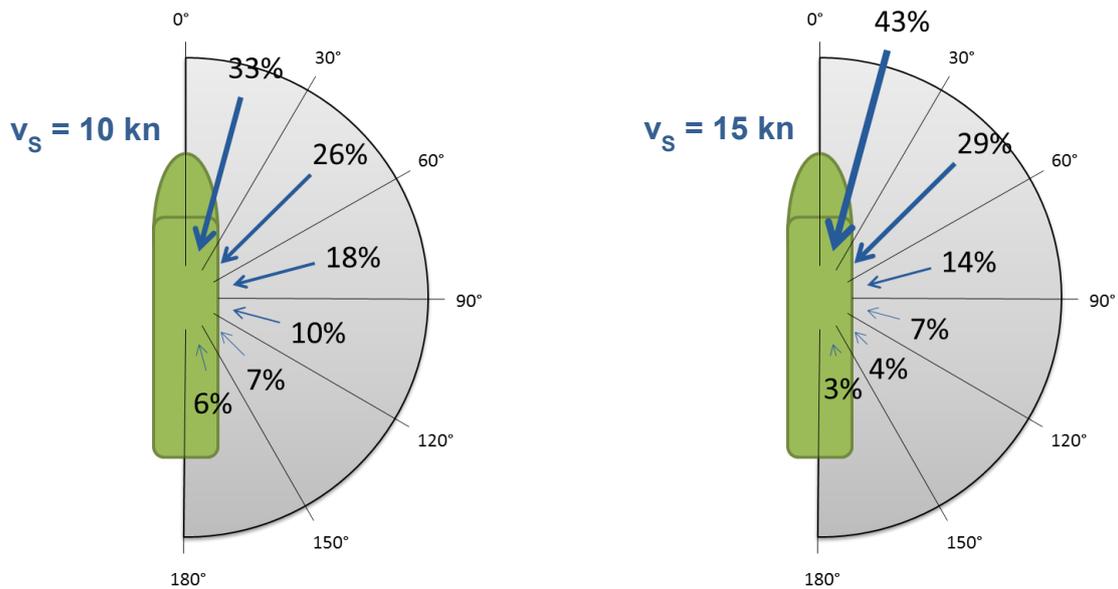


Abbildung 4: Ergebnis der statistischen Auswertung für eine Schiffsgeschwindigkeit von 10 kn und 15 kn

Als ein weiteres wichtiges Bewertungskriterium für Windzusatzantriebe auf Schiffen in der kommerziellen Seefahrt wird der benötigte Platz an Deck, also indirekt die benötigte Segelfläche angesehen. Grund hierfür ist das kommerziell genutzte Schiffe den Platz an Deck für Ihre eigentlichen Aufgaben benötigen, z.B. als Ladeluke, Arbeitsdeck oder Passagierbereich. Auch wegen der notwendigen Hafenlogistik ist die Decksfläche deshalb wirtschaftlich sehr wichtig.

Die folgende Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der Flächen-Effektivität verschiedener Segelsysteme bezogen auf ein klassisches Hochsegel bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 15 Knoten.

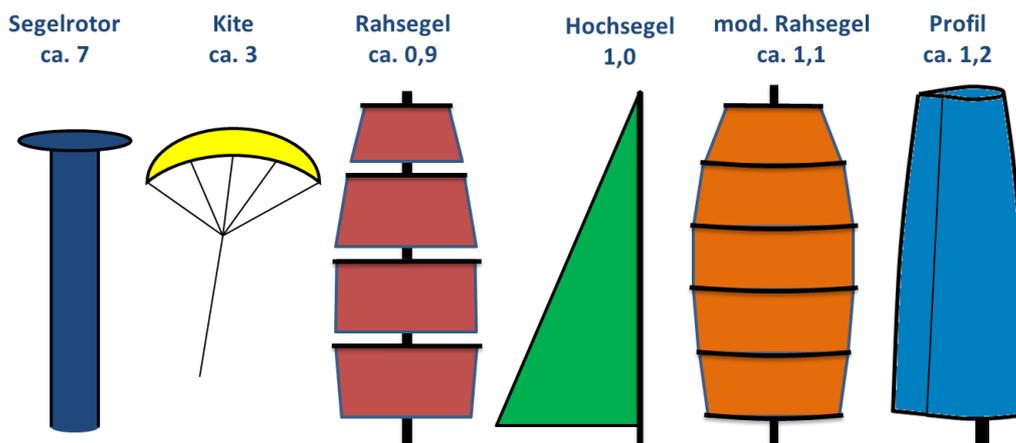


Abbildung 5: Faktor für mittlere Flächeneffektivität bei 15 kn Schiffsgeschwindigkeit gegenüber Hochsegel

Es zeigt sich in dem Vergleich, daß hinsichtlich des Flächenbedarfs das Kite-Segel und der Flettner-Rotor allen anderen Systemen erheblich überlegen sind.

Um zu bestimmen wie der optimale Windzusatzantrieb aussehen muß, wurden aber neben den schon genannten zwei wichtigsten Bewertungskriterien noch drei weitere in die Betrachtung aufgenommen:

- Aufwand für Wartung und Instandhaltung
- Möglicher Einfluß auf die Schiffssicherheit
- Personalaufwand für die Bedienung, bzw. Automatisierungsfähigkeit des Segelsystems

Die Bewertung erfolgte mit „-“ Minus = mäßige bis schlechte Eigenschaften

„+“ Plus = gute bis sehr gute Eigenschaften

„/“ Mittelmäßig = Kein klarer Vorteil oder Nachteil

Segel-system	Platz-bedarf	Wartungs-aufwand	Schiffs-sicherheit	Personal-aufwand	Am Wind Eigen-schaften
Tuchsegel	-	-	-	-	/
Kitesegel	+	-	-	-	-
Profilsegel	/	+	-	+	+
Segel-maschine	+	+	+	+	/

Abbildung 6: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse

Die Analyse zeigt, dass die Segelmaschine (Flettner-Rotor) das vielversprechendste System ist, um auf einem Arbeitsschiff den Wind als additives Antriebssystem zur Treibstoffeinsparung zu nutzen.

Optimierungspotential besteht hier allerdings im Bereich der „Am Wind“ Eigenschaften.

Deshalb wurde sich in dem hier dokumentierten Projekt darauf konzentriert, eine signifikante Verbesserung zu erzielen und die positiven Eigenschaften des Flettner-Rotors mit denen eines Profilsiegels zu kombinieren. Als Ergebnis wurde ein sogenanntes „Rotorprofil“ entwickelt.

3. CFD Berechnungen und deren Ergebnisse

Ausgehend von den o.g. Erkenntnissen wurde eine Vielzahl von dreidimensionalen CFD Berechnungen mit dem Software System „Ansys Fluent“ durchgeführt. Als Referenz dienten hierbei immer Modellberechnungen des bekannten Flettner-Rotors. Es wurden mehrere geometrische Varianten des Rotorprofiles durchgerechnet. Hierbei wurde der Hinterkasten in seiner Profiltiefe vergrößert und verkleinert und das Streckungsverhältnis des Rotorprofiles variiert. Als effektivste Lösung etablierte sich ein Rotorprofil, bei dem der Rotor und der Hinterkasten ein Verhältnis von 1:1, also gleiche Profiltiefe aufweisen.

Die folgende Abbildung 7 zeigt als Beispiel die Strömungsgeschwindigkeiten bei Anströmwinkel = 60 Grad und $\Lambda = 5$ ($\Lambda = \text{Schnellaufzahl} = \text{Verhältnis Umfangsgeschwindigkeit Rotor zu Windgeschwindigkeit}$).

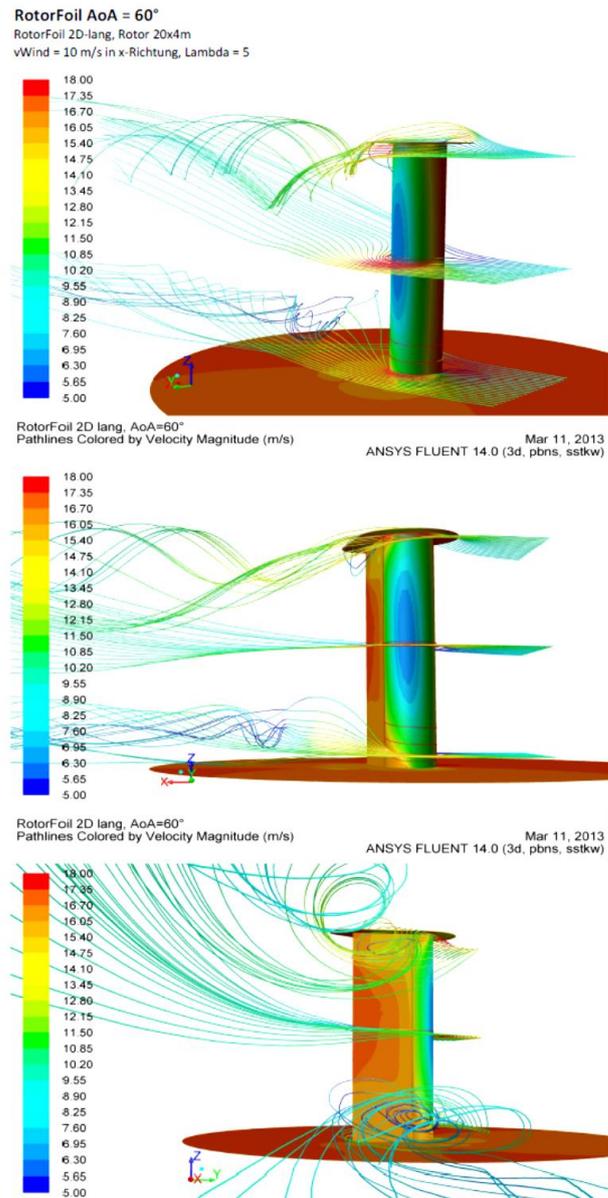


Abbildung 7: Beispiele für Strömungsberechnungen

Die folgenden Diagramme (Abb. 8 und 9) zeigen eine komprimierte Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus den CFD Berechnungen.

Hierbei entspricht „Rotor“ = Flettner_Rotor,

„RF“ = Rotorfoil = Rotorprofil

c_L = Auftriebsbeiwert,

c_D = Widerstandsbeiwert.

Für das Rotorprofil wurden zwei Streckungsverhältnisse = Verhältnis Durchmesser Rotor zu seiner Gesamtlänge untersucht.

Rotor 20 m lang und Durchmesser = 4 m entspricht kleines Streckungsverhältnis und

Rotor = 20 m lang und Durchmesser = 2 m entspricht großes Streckungsverhältnis.

Die Ergebnisse belegen, dass je größer das Streckungsverhältnis ist, desto besser werden die Beiwerte und damit die Segeleigenschaften. Der Hauptgrund liegt in den störenden Strömungseinflüssen der Rotorenden oben und unten. Bei einem großen Streckungsverhältnis sind die ungestörten Strömungsbereiche anteilig größer was zu besseren Ergebnissen führt. Leider lassen sich in Schiffsanwendungen selten günstig große Streckungsverhältnisse realisieren, weil die maximale Durchfahrtshöhe und Stabilität des Schiffes die Rotorprofilhöhe begrenzen. Allerdings könnte man in einem nächsten Optimierungsschritt über teleskopierbare Segelsysteme nachdenken welche in Schwachwindphasen austeleskopiert mit maximaler Fläche und bestem Streckungsverhältnis betrieben werden könnten.

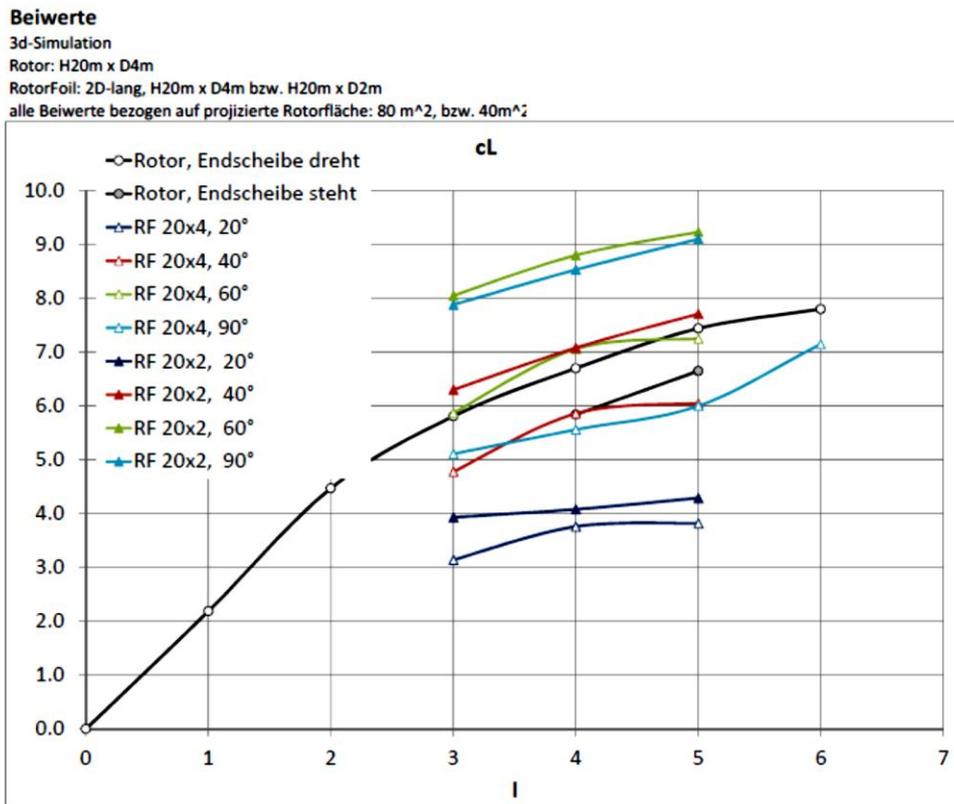


Abbildung 8: Auftriebsbeiwerte des Rotorprofils für verschiedene Streckungsverhältnisse

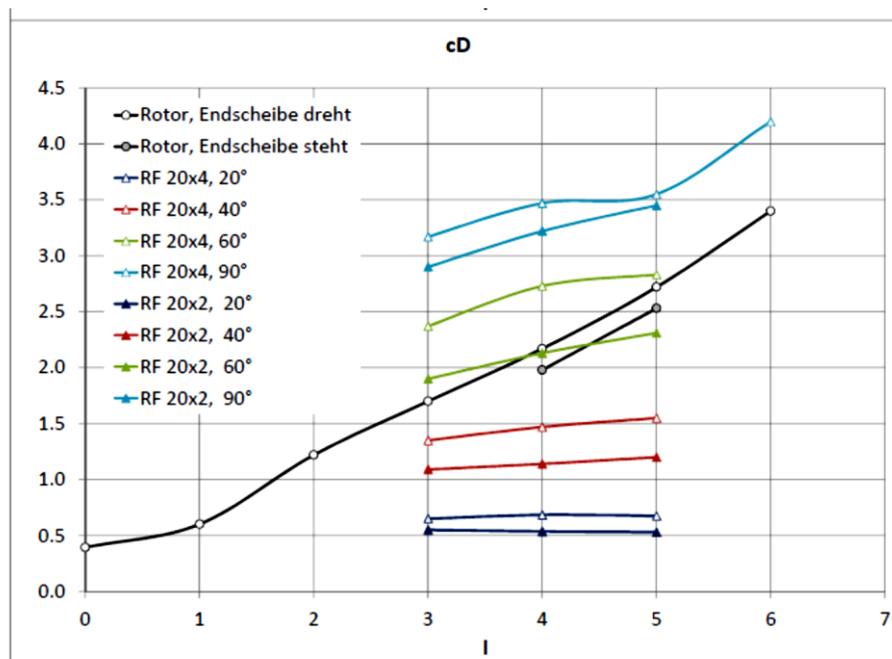


Abbildung 9: Widerstandsbeiwerte des Rotorprofils für verschiedene Streckungsverhältnisse

Die Diagramme zeigen außerdem, daß mit dem Rotorprofil ähnlich gute Auftriebsbeiwerte wie mit einem Flettner-Rotor erzielt werden können, während der Widerstand bei kleinen Anströmwinkeln deutlich niedriger ist. Dadurch wird die Gleitzahl für das Rotorprofil teilweise doppelt so hoch wie die des Flettner-Rotors, was wiederum belegt, daß die Am Wind-Eigenschaften des Rotorprofils signifikant besser sind, als die des bekannten Flettner-Rotors.

Das nun folgende Diagramm (Abb. 10) beantwortet eine der wesentlichen Fragen, die während des Projektes geklärt werden mußten. Nämlich die Frage, ob das Rotorprofil komplett drehbar auf dem Deck gelagert werden soll, um je nach scheinbarer Windrichtung optimal in den Wind gestellt werden zu können wie ein Profil Segel?

Der bauliche Aufwand hierfür wäre recht hoch und müsste durch entsprechend höhere/bessere Treibstoffeinsparungen gerechtfertigt werden.

Abbildung 10 zeigt die Schubbeiwerte also die Vortriebskraft des Rotorprofils, über dem Anströmwinkel. Die rot gestrichelte Kurve beschreibt die optimale Anstellung wenn das Rotorprofil drehbar auf Deck gelagert wäre. Die blau gestrichelte Kurve beschreibt die Schubbeiwerte für ein fest stehendes, nicht drehbares Rotorprofil. Es zeigt sich, daß die beiden Kurven im ertragsstarken Anströmwinkelbereich zwischen 40 Grad und 60 Grad kaum voneinander abweichen. Erst oberhalb von 60 Grad ergibt sich ein Vorteil für das schwenkbare Rotorprofil. Bei 90 Grad Anströmwinkel erreicht das schwenkbare Rotorprofil einen Schubbeiwert von 7.2 während das feststehende Rotorprofil noch 6.0 erreicht. Diese relativ kleine Differenz multipliziert mit der Seltenheit der großen Anströmwinkel (siehe Kapitel 1) rechtfertigt nicht den baulichen Aufwand eines drehbaren Rotorprofils.

Mit einem fest stehenden Rotorprofil kann der Hinterkasten auf vielfältige Weise genutzt werden (siehe hierzu auch Kapitel 5 & 6), was für die Wirtschaftlichkeit des gesamten Windzusatzantriebes von hoher Relevanz ist.

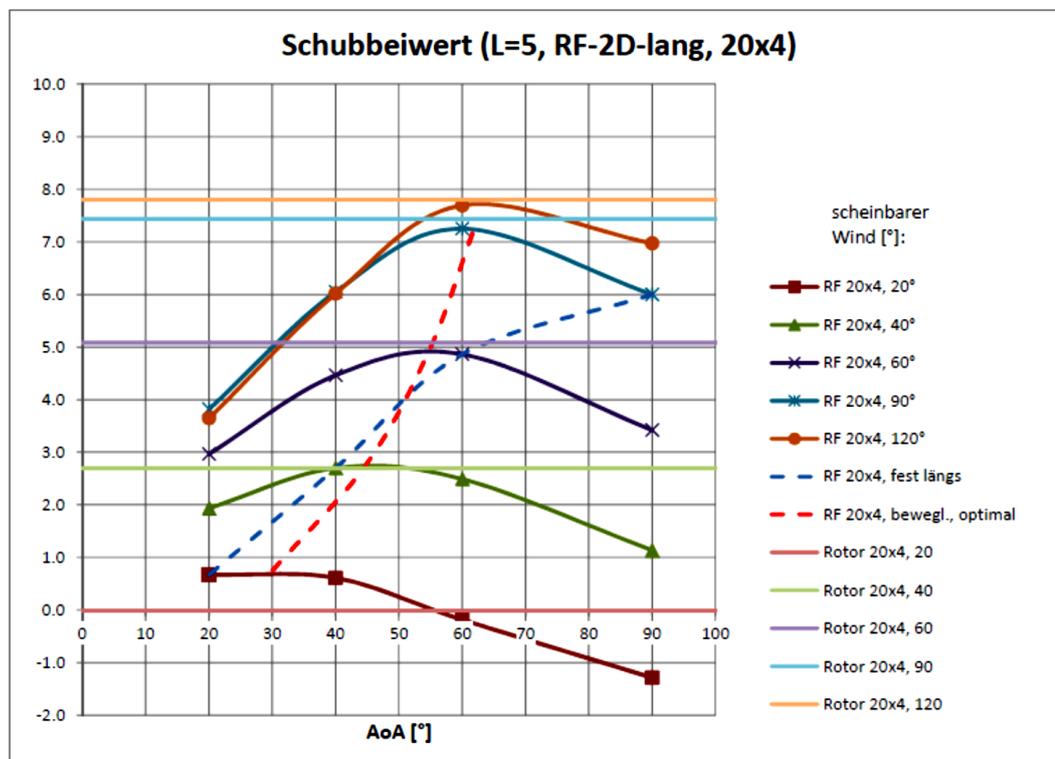


Abbildung 10: Schubbeiwerte für drehbares und fest stehendes Rotorprofil

Nachdem die theoretische Betrachtung zu klaren und positiven Ergebnissen gekommen war, wie ein optimaler Windzusatzantrieb aussehen muß, war es dringend erforderlich diese Ergebnisse durch Windkanalversuche abzusichern.

4. Konstruktion und Bau eines Windkanal Modells

Das Windkanalmodell wurde speziell für die baulichen Gegebenheiten des Windkanals der EADS Airbus in Bremen entwickelt, weil dieser am besten für das Vorhaben geeignet erschien. Die Messungen sollten einer ähnlichen Strategie folgen wie die vorangegangenen Berechnungen, um vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Hierzu gehört u.a. daß der bekannte Flettner-Rotor als Referenz und Kalibrierung mitvermessen wird und auch hier für das Rotorprofil unterschiedliche Streckungsverhältnisse untersucht werden können.

Daraus ergab sich das Windkanalmodell, wie es als Übersicht in den folgenden drei Abbildungen 11 bis 13 dargestellt ist. Der „Rotor 1 zeigt hier den Flettner-Rotor mit rotierender Endscheibe 150 mm Durchmesser und 750 mm lang. Das ganze Modell ist aus Aluminium gefertigt, wälzgelagert und benutzt als Antrieb den Motor einer Oberfräse welcher

außerhalb des Windkanals angeordnet ist. Das Modell wird auf einer drehbaren Scheibe gelagert um die unterschiedlichen Anströmwinkel fahren zu können.

Der Modellaufbau „Rotor 2“ entspricht dem „Rotorprofil kurz“ welches denselben Rotor weiterbenutzt, aber einen Endkasten ergänzt bekommt. Die rotierende Endscheibe wird durch die stehende Endscheibe des Rotorprofils ausgetauscht.

Für den weiteren Umbau zu „Rotor 3“ entsprechend dem „Rotorprofil lang“ (also großes Streckungsverhältnis) wird sowohl der Endkasten als auch der Rotor in seiner Länge verdoppelt. Der Aluminium Rotor wurde feinstgewuchtet um Drehzahlen bis 15000 rpm zu ermöglichen.

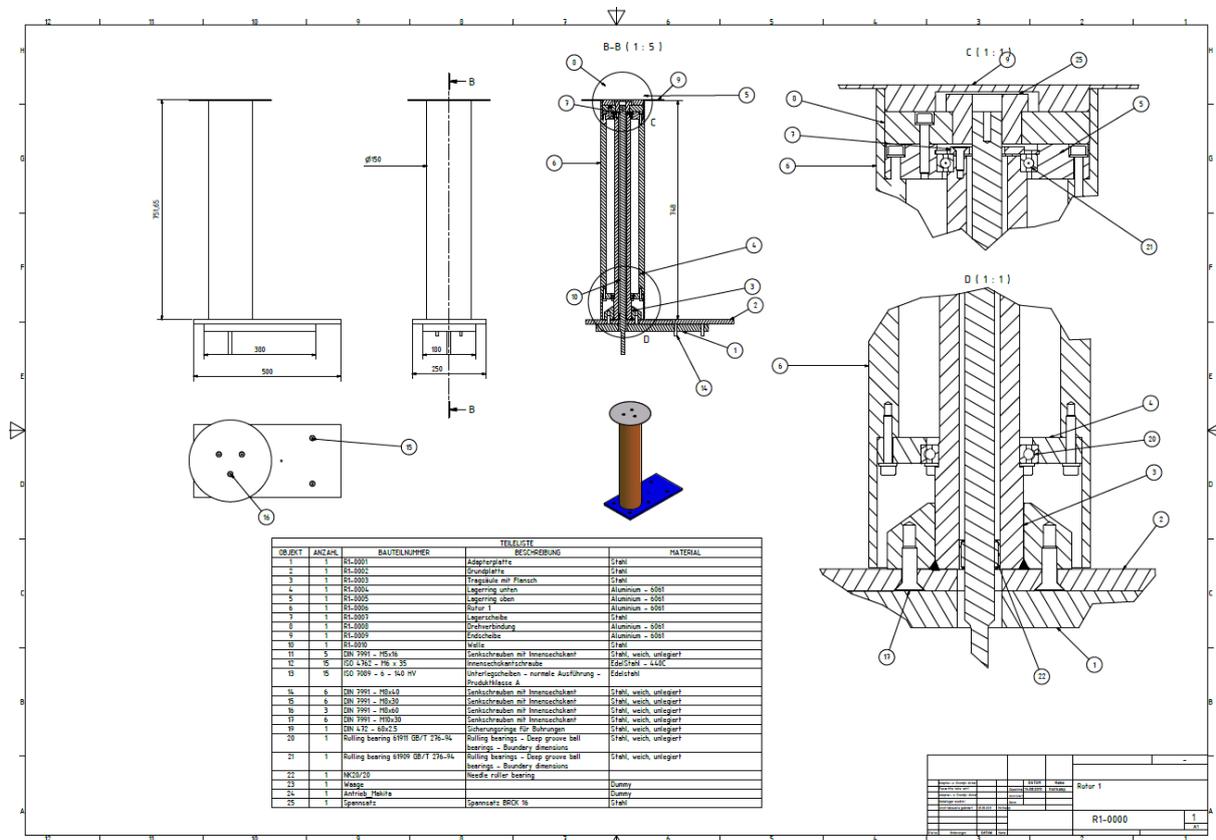


Abbildung 11: Windkanalmodell „Rotor 1“ (Flettner-Rotor)

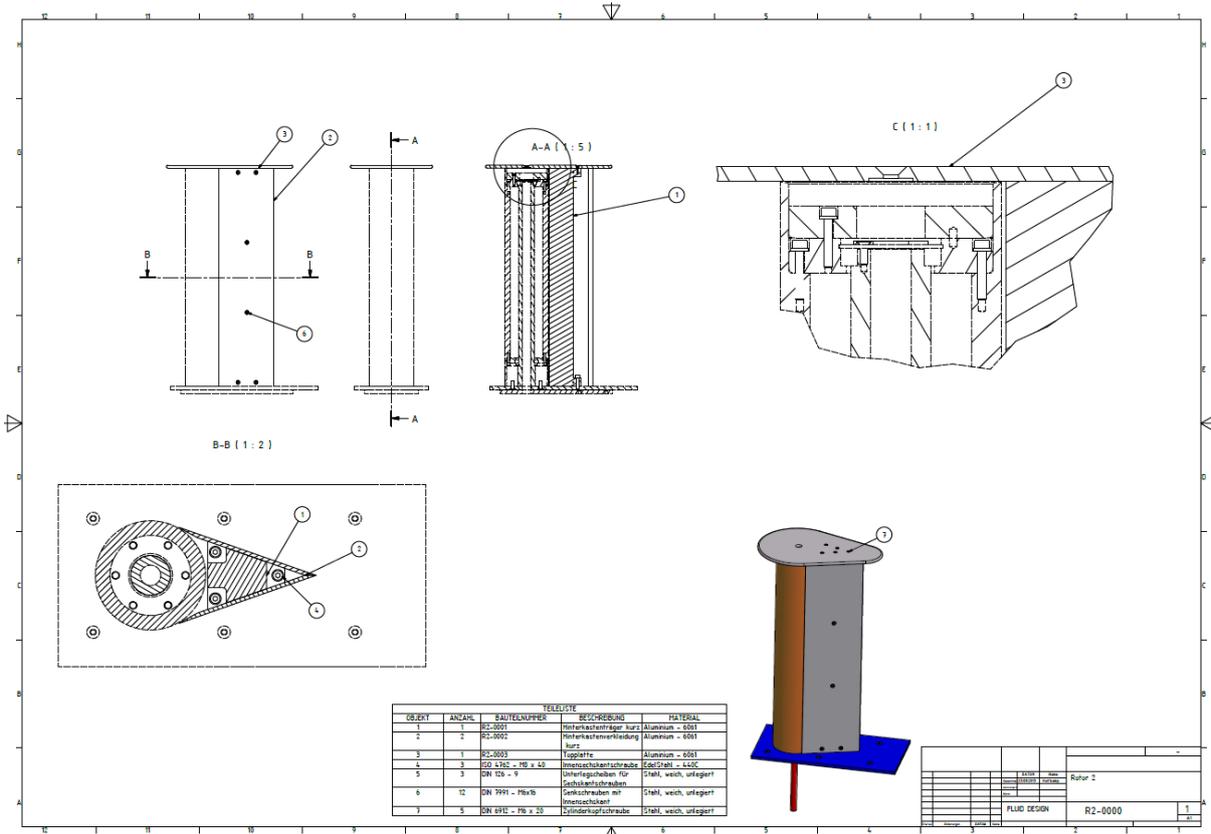


Abbildung 12: Windkanalmodell "Rotor 2" (Rotorprofil kurz)

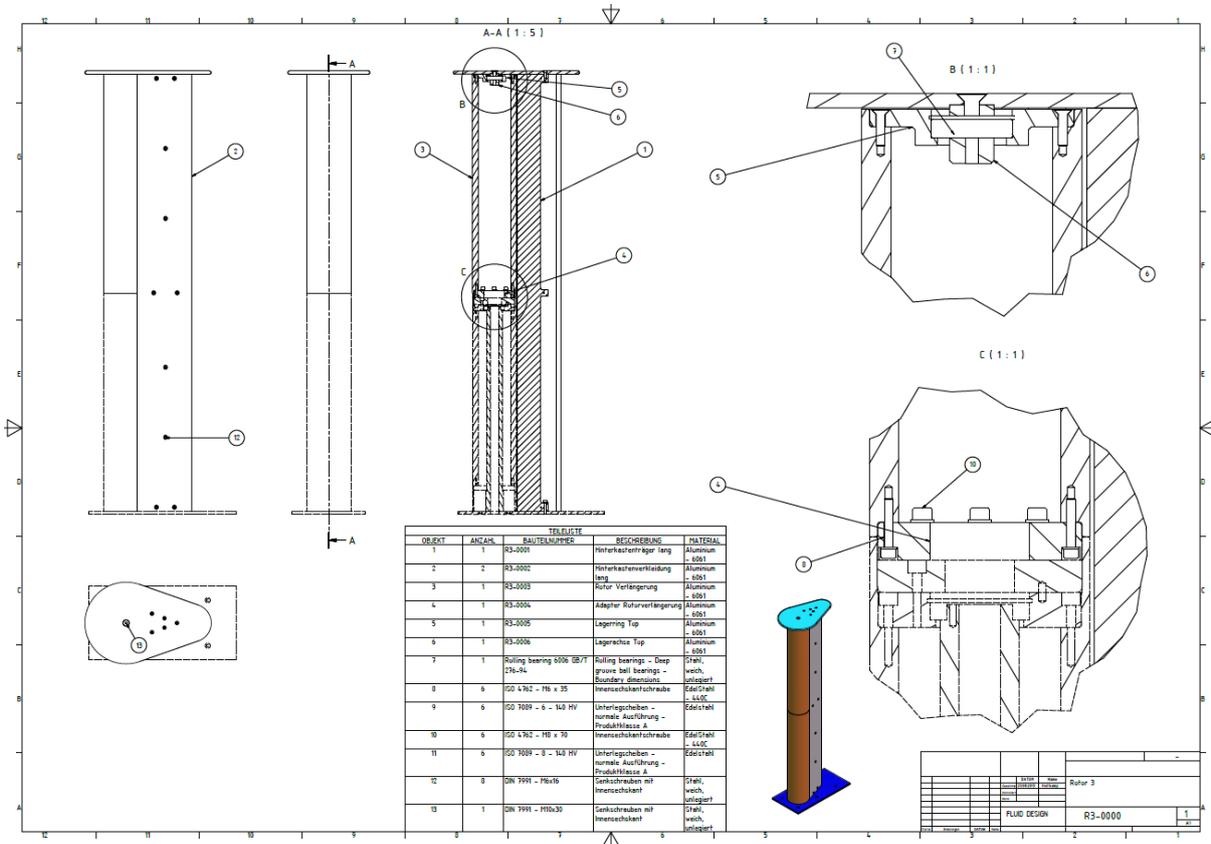


Abbildung 13: Windkanalmodell "Rotor 3" (Rotorprofil lang)

Das folgende Foto zeigt alle Einzelteile des Modellbaus incl. Hilfswerkzeuge kurz vor Einbau in den Windkanal.

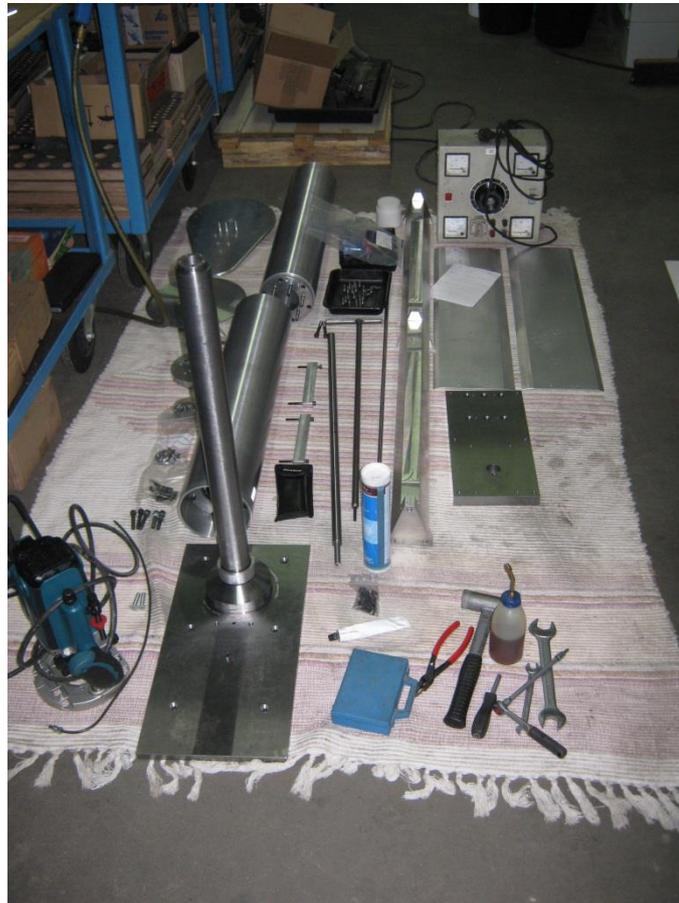


Abbildung 14: Einzelteile der Windkanalmodelle

5. Planung, Durchführung und Ergebnisse der Windkanalmessungen

Die Windkanalmessungen wurden am 15. Und 16. Oktober 2013 in Bremen im Airbus Windkanal durchgeführt. Im Vorfeld hatten diverse Abstimmungen stattgefunden um den Versuchsaufbau vorzubereiten.

Die Messungen selber wurden objektiv und ausschließlich von Airbus Personal und Equipment ausgeführt. Die Windkanal Crew ist sehr erfahren in dieser Art von Vermessungen, da aerodynamische Untersuchungen für die Luftfahrt mit dem gleichen Equipment standardmäßig durchgeführt werden. Nur das eigentliche Modell war hier außergewöhnlich.

Zur Veranschaulichung wurden neben den Messungen auch Videos mitgeschnitten, bei denen die Strömung mit Fädchen und UV Licht sowie mit Rauchsonden sichtbar gemacht wurde.

Nach dem Abschluß der Messungen wurden die Ergebnisse dokumentiert und von Airbus an INNOVEN übergeben.

Die Ergebnisse finden sich für das kurze und das lange Rotorprofil in den nächsten Abbildungen auf den folgenden Seiten.



Abbildung 15: Rotormodell 1 (Flettner-Rotor zur Kalibrierung)



Rotormodell 2 = kleines Streckungsverhältnis (1:5)

Die unten dargestellten Messergebnisse für Auftrieb und Widerstand bestätigen im Rahmen der erreichbaren Genauigkeiten die Berechnungsergebnisse (siehe hierzu die Diagramme auf Seiten 12 und 13). Tendenziell fallen die Messergebnisse etwas günstiger aus, als die Berechnungen. Der gemessene Auftrieb ist zum Teil höher bei gleichzeitig geringerem Widerstand. Es kann also davon ausgegangen werden, dass wenn das Segelsystem mit den rechnerischen Beiwerten ausgelegt wird, man auf der sicheren Seite liegt.

Abbildung 16: Rotormodell 2, Rotorprofil kleines Streckungsverhältnis (1:5)

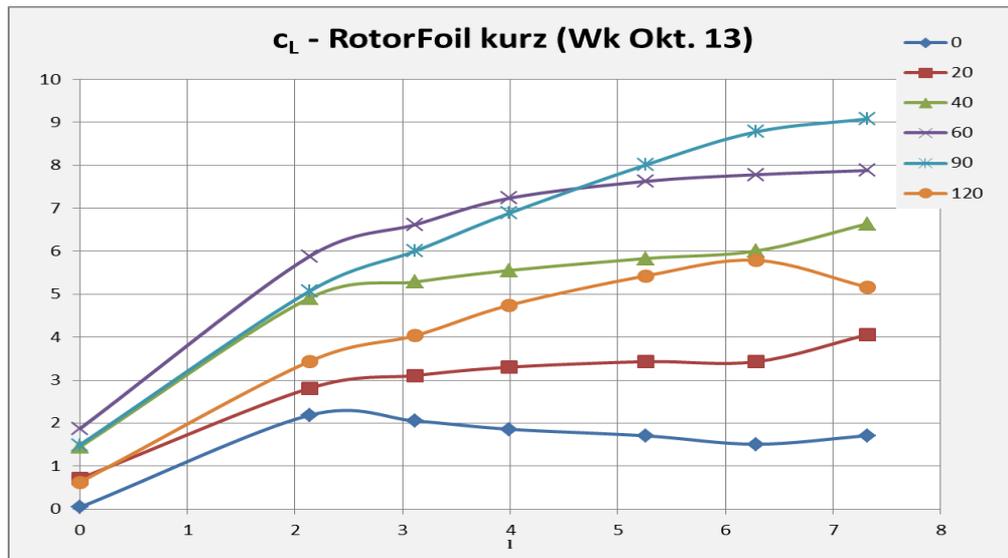


Abbildung 17: Messergebnisse Auftriebsbeiwert Rotorprofil kurz

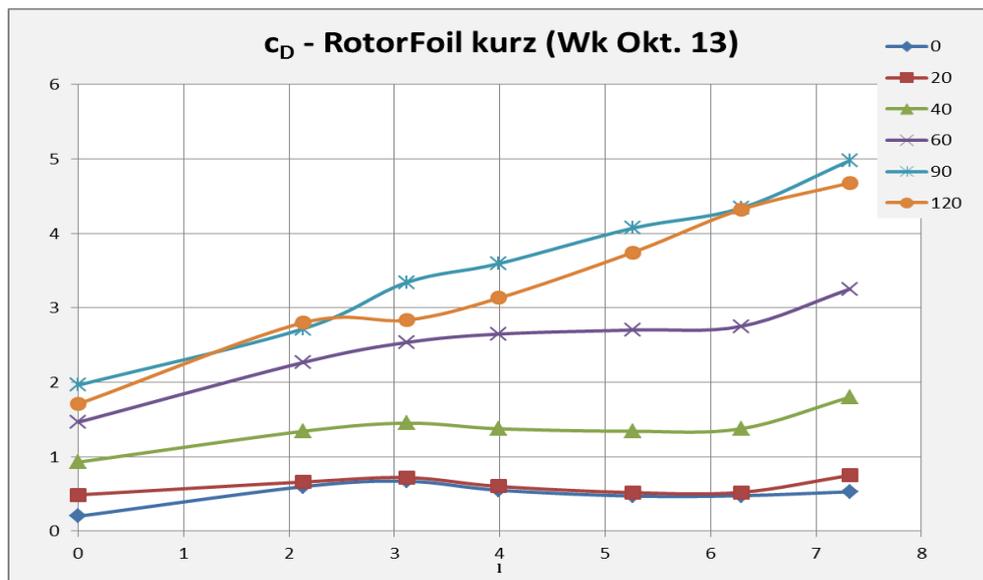


Abbildung 18: Messergebnisse Widerstandsbeiwert Rotorprofil kurz



Rotormodell 3 = großes Streckungsverhältnis (1:10)

Grundsätzlich zeigen die Messergebnisse auch bei diesem Modell des Rotorprofils etwas bessere Beiwerte als die CFD Berechnungen. Signifikant sind die Verbesserungen gegenüber dem Rotorprofil mit Streckungsverhältnis 1:5. So wird z.B. bei $\lambda = 5$ ein Auftriebsbeiwert von 11.2 bei 90 Grad Anströmwinkel gegenüber 7.8 beim kurzen Rotorprofil erreicht. Da gleichzeitig der Widerstandsbeiwert niedriger ist, ergibt sich für diesen Betriebspunkt eine Verbesserung der Gleitzahl um 69 % nur wegen des größeren Streckungsverhältnisses von 1:10 !

Aufgrund dieser Erkenntnisse sollte bei der Auslegung eines realen Segelsystems immer auf ein Streckungsverhältnis deutlich über 1:5 geachtet werden.

Abbildung 19: Rotormodell 3, Rotorprofil großes Streckungsverhältnis (1:10)

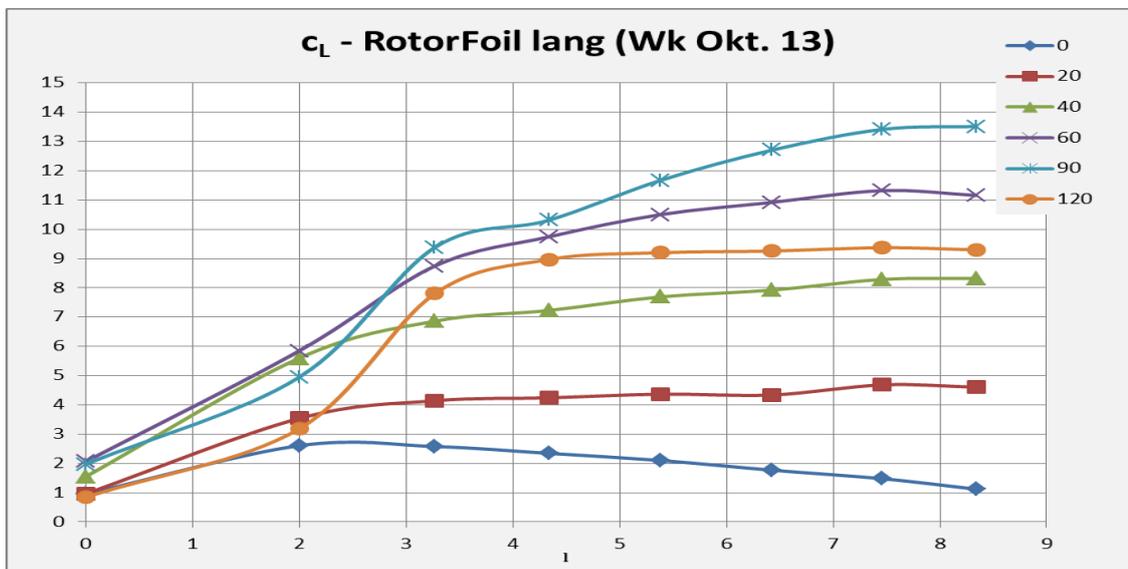


Abbildung 20: Messergebnisse Auftriebsbeiwert Rotorprofil lang

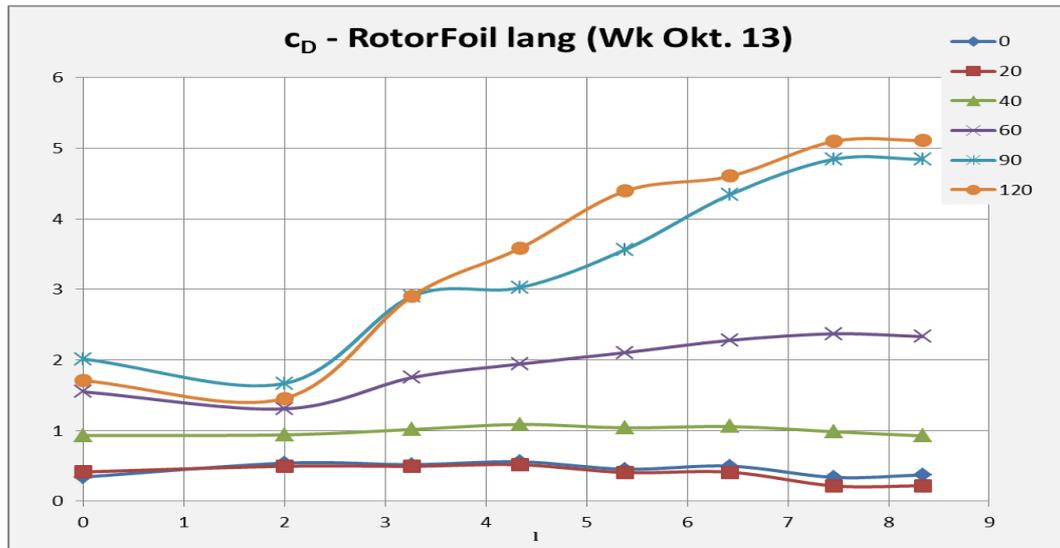


Abbildung 21: Messergebnisse Widerstandsbeiwert Rotorprofil lang

6. Vergleich der neu entwickelten Segeltechnologie mit dem klassischen Flettner Rotor

Der klassische Flettner Rotor ist ein sehr leistungsfähiges Segelsystem welches in mehreren Einzelprojekten (reale Anwendung auf Schiffen) praktisch erprobt wurde und sich dabei bewährt hat. Die Grundlagenuntersuchungen in Kapitel 1 belegen ebenfalls die Vorteile des Flettner-Rotors gegenüber anderen bekannten Segeltechnologien.

Das in diesem Bericht zusammengefasste Projekt hatte das Ziel mögliche Weiterentwicklungen und Optimierungspotenziale des Flettner-Segelsystems zu ermitteln, um dessen Verbreitung und Marktzugang in die moderne Seeschifffahrt zu erleichtern.

Das vorliegende Kapitel zeigt, daß in diesem Projekt zukunftsweisende Weiterentwicklungen des Flettner-Rotors erarbeitet wurden, die zu einer signifikanten Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Windzusatzantriebes führen.

Optimierungspotenziale des Flettner Rotors wurden in drei Schwerpunkten identifiziert:

1. Verbesserung der aerodynamischen Beiwerte, insbesondere der Gleitzahlen um die „Am Wind Eigenschaften“ zu verbessern, da hier das grösste Potenzial zum Treibstoff sparen vorhanden ist (siehe Kapitel 1)
2. Verringerung der Antriebsleistung für den Rotor selbst, um dadurch direkt Brennstoff zu sparen und um den wirtschaftlichen Betriebsbereich zu vergrössern (dadurch längere Einsatzzeiten und dadurch mehr Treibstoffersparnis).

3. Maschinenbauliche Optimierung des Rotors und bessere Integration in den Schiffskörper um Baukosten am Rotor selbst als auch im Schiffbau Fundament zu erzielen.

Zu 1.: Wie die Ergebnisse aus CFD Berechnungen und Windkanalmessungen zeigen kann der Widerstandsbeiwert des zylindrischen Rotors durch Hinzufügen einer „Abrißkante“ in Form eines stationären Hinterkastens den Widerstand bei Anströmwinden kleiner 60 Grad signifikant verringern. Zum Beispiel kann bei 40 Grad der Widerstand fast halbiert werden. Da gleichzeitig ähnliche Auftriebsbeiwerte erreicht werden wie beim Rotor alleine, erhöht sich die Gleitzahl in ähnlichem Verhältnis, wie sich der Widerstand verringert.

Dadurch werden Treibstoffeinsparungen schon bei kleineren Anströmwinden, die statistisch häufiger auftreten (siehe Kapitel 1) möglich. Insbesondere wird diese Tatsache verstärkt durch eine gleichzeitige Verringerung der notwendigen Antriebsleistung für den Rotor. (siehe 2.)

Aber die Verringerung des Widerstandes hat auch eine Treibstoffeinsparung bei Nicht-Segelbetrieb also z.B. bei Anströmwinden kleiner 30 Grad zur Folge, weil sich der gesamte Schiffswiderstand im Vergleich zu einem Schiff mit Flettner Rotoren verringert. D.h. das Rotorprofil bremst bei Wind von vorne entsprechend weniger.

Zu 2.: Die bisher bekannten Bauausführungen des Flettner Rotors beruhen auf einer inneren stationären Tragsäule (Pilon), um welche der Rotor rotiert. Die Tragsäule leitet hierbei die Kräfte aus dem Rotorbetrieb in die Schiffsstruktur ab, beinhaltet die Rotorlagerung und in der Regel auch den Rotor-Antrieb sowie Hilfsaggregate.

Diese Bauart führt zum einen dazu, daß zwischen Tragsäule und Rotorinnenfläche Luftreibung entsteht, und zum anderen, daß die Tragsäule aufgrund ihrer Einbauten begehbar sein muss, also einen Durchmesser nur geringfügig kleiner als der Rotor selbst aufweist. Deshalb muss zumindest das untere Rotorlager einen großen Durchmesser (3 bis 4 Meter) mit entsprechend hohen Umfangsgeschwindigkeiten und damit verbundener Lagerreibung (Verlustleistung) aufweisen. Sowohl die Rotor-Luftreibung innen und außen, als auch die Lagerreibung haben einen wesentlichen Einfluß auf die notwendige Antriebsleistung für den Flettner-Rotor über der Drehzahl. Einen weiteren maßgeblichen Einfluß auf die Rotor-Antriebsleistung hat die rotierende Endscheibe des Flettner Rotors. Durch ihren i.d. Regel ca. doppelten Durchmesser wie der Rotor selbst erzeugt sie überproportional zu ihrer Fläche viel Verlustleistung aus Luftreibung.

Bei der hier vorgestellten weiterentwickelten Segelmaschine übernimmt der Hinterkasten im Prinzip die Aufgaben der Tragsäule (siehe hierzu auch Kapitel 6). Daraus ergeben sich die folgenden Vorteile zur Minimierung der Verlustleistung durch Reibung:

- Der Rotor kann während des Betriebes als geschlossenes Volumen ohne Austausch mit der Aussenatmosphäre funktionieren. D.h. die eingeschlossene Luft rotiert mit und erzeugt **keine** Reibung an der Rotorinnenfläche.

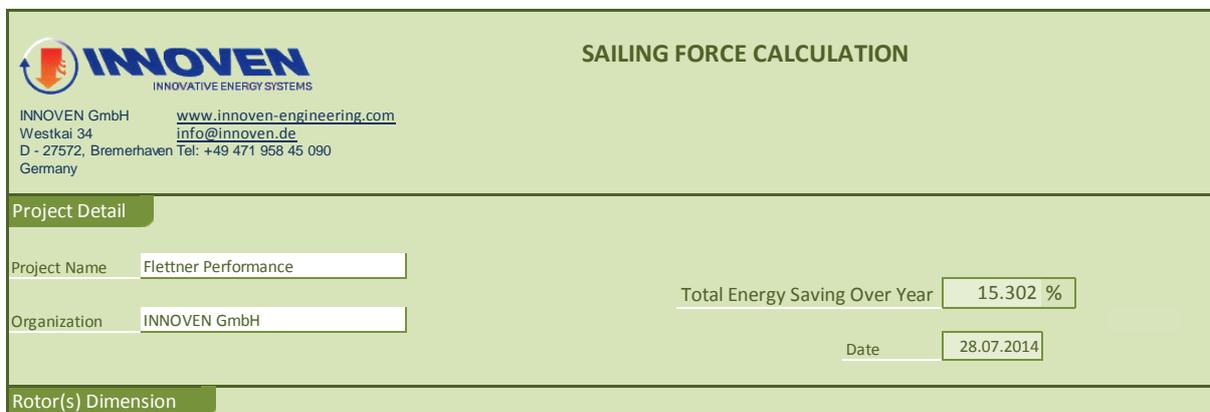
- Die Rotorlagerung jeweils an seinen Enden kann mit relativ kleinen Lagerzapfen (Durchmesser < 1 Meter) ausgeführt werden, was die Umfangsgeschwindigkeiten und damit signifikant die Lagerreibung reduziert.
- Die Endscheibe wird als nicht rotierend, also stationär, am Hinterkasten befestigt ausgeführt, so daß hier **keine** Reibungsverluste mehr entstehen, welche der Antrieb überwinden muß.

Diese drei Maßnahmen zur Optimierung dürften rechnerisch die erforderliche Antriebsleistung für das Rotorprofil auf ca. die Hälfte der erforderlichen Leistung des Flettner-Rotors bei gleichen Drehzahlen bringen.

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die mit INNOVEN Software berechneten Treibstoffeinsparungen für ein fiktives Schiff bei gleichen Randbedingungen mit Flettner-Rotoren und mit dem Rotorprofil, das entsprechend weniger Reibungsverluste und einen geringeren aerodynamischen Widerstand aufweist.

Die Treibstoffeinsparung der Flettner Rotoren beträgt hier **15.3%** im Jahresmittel. Das Rotorprofil mit den unter 1. und 2. beschriebenen Optimierungen erreicht mit gleichen Randbedingungen eine Treibstoffeinsparung von **21.5 %**.

Das bedeutet durch diese Optimierungen kann die Wirtschaftlichkeit des Windzusatzantriebes um ca. **40 %** gesteigert werden.



INNOVEN
INNOVATIVE ENERGY SYSTEMS

INNOVEN GmbH www.innoven-engineering.com
Westkai 34 info@innoven.de
D - 27572, Bremerhaven Tel: +49 471 958 45 090
Germany

SAILING FORCE CALCULATION

Project Detail

Project Name Total Energy Saving Over Year

Organization Date

Rotor(s) Dimension

Abbildung 22: Berechnungsergebnis Brennstoffeinsparung Flettner-Rotor

INNOVEN INNOVATIVE ENERGY SYSTEMS		SAILING FORCE CALCULATION	
INNOVEN GmbH www.innoven-engineering.com Westkai 34 info@innoven.de D - 27572, Bremerhaven Tel: +49 471 958 45 090 Germany			
Project Detail			
Project Name	<input type="text" value="Rotorfoil Performance"/>	Total Energy Saving Over Year	<input type="text" value="21.518 %"/>
Organization	<input type="text" value="INNOVEN GmbH"/>	Date	<input type="text" value="28.07.2014"/>

Abbildung 23: Berechnungsergebnis Brennstoffeinsparung Rotorprofil

Zu 3.: Wie oben beschrieben konnte der Rotor selber z.B. durch Verwendung kleinerer Lagerdurchmesser und einer stationären Endscheibe (die nicht auf Fliehkräfte ausgelegt werden muß) maschinenbaulich vereinfacht werden. Hierdurch ergibt sich ein Kostenvorteil, der vergrößert wird durch die besseren Integrationsmöglichkeiten des Rotorprofils in den Schiffskörper. D.h. es kann z.B. eine Mehrfachnutzung des Hinterkastens stattfinden, indem dort Lüftungsschächte und/oder Abgaskanäle hindurchgeführt werden. Die stationäre Endscheibe ist sehr gut als Geräteträger z.B. für Radar – und/oder Sattelitenantennen sowie für Navigationslichter geeignet. Dadurch können Komponenten wie Schornsteine und Signalmasten beim Schiffbau eingespart werden was zu einem weiteren Kostenvorteil des Rotorprofils führt, da der bekannte Flettner Rotor die oben genannten Mehrfachnutzungen nicht ermöglicht.

Insgesamt werden diese unter 3 beschriebenen maschinenbaulichen Optimierungen mit **10 %** Wirtschaftlichkeitsverbesserung des Segelsystems abgeschätzt.

Somit ergibt sich in der Summe der Optimierungen die in 1, 2 und 3 beschrieben sind, eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Rotorprofils von **ca. 50 %** im Vergleich zum herkömmlichen Flettner-Rotor.

7. Basic Design eines möglichen Prototypen für reale Anwendung

Im Rahmen des Projektes wurde ein vorläufiger Entwurf für einen Prototyp des Rotorprofils entwickelt. Die folgenden Zeichnungen mit Längs- und Querschnitten zeigen den grundsätzlichen Aufbau der Maschine. Die Abmessungen sind hier zunächst so gewählt wie die 2 Prototypen auf einem möglichen Testschiff, der „LEV TORNADO“ installiert werden könnten (siehe hierzu auch Kapitel 8).

Der Rotor ist hier in seiner Länge einmal geteilt, wodurch eine zusätzliche Lagerung in halber Höhe ermöglicht wird, was wiederum interne Aussteifungen also Material im Rotor einspart. Außerdem ist der Rotor oben in der stationären Endscheibe sowie unten auf Deckshöhe

gelagert. Der Hinterkasten ist fest mit dem Schiffskörper verbunden und er beinhaltet den elektrischen Antrieb, Abgaskanäle sowie Maschinenraum Abluft- und Zuluftkanäle.

Am Beispiel der „LEV TORNADO“ würden die zwei Rotorprofile die vorhandenen Schornsteine ersetzen. Der Hinterkasten wird aus Stahl gefertigt, der Rotor aus Stahl oder alternativ aus Aluminium, wenn sich daraus ein Kostenvorteil ergibt.

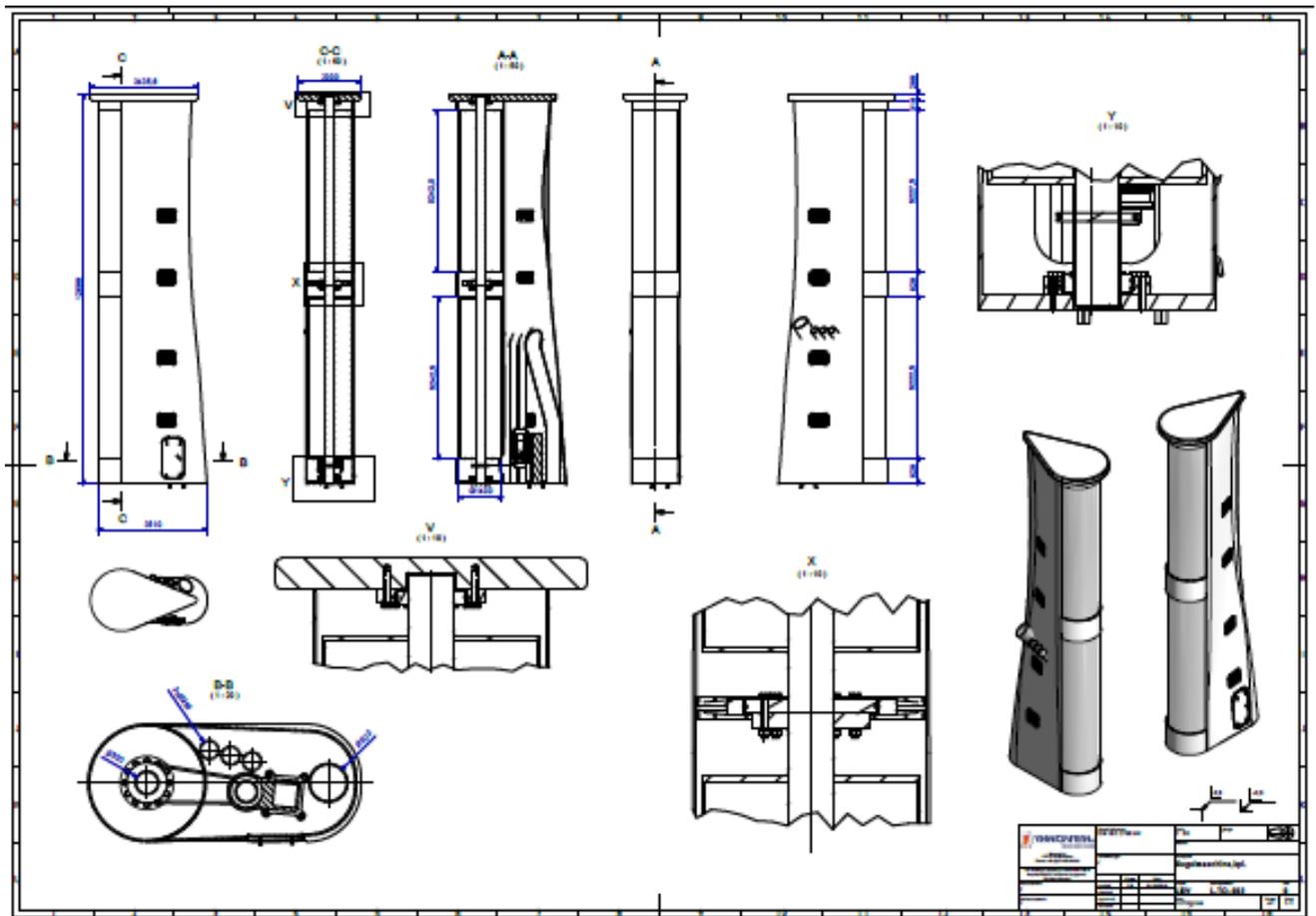


Abbildung 24: Basic design eines Rotorprofils

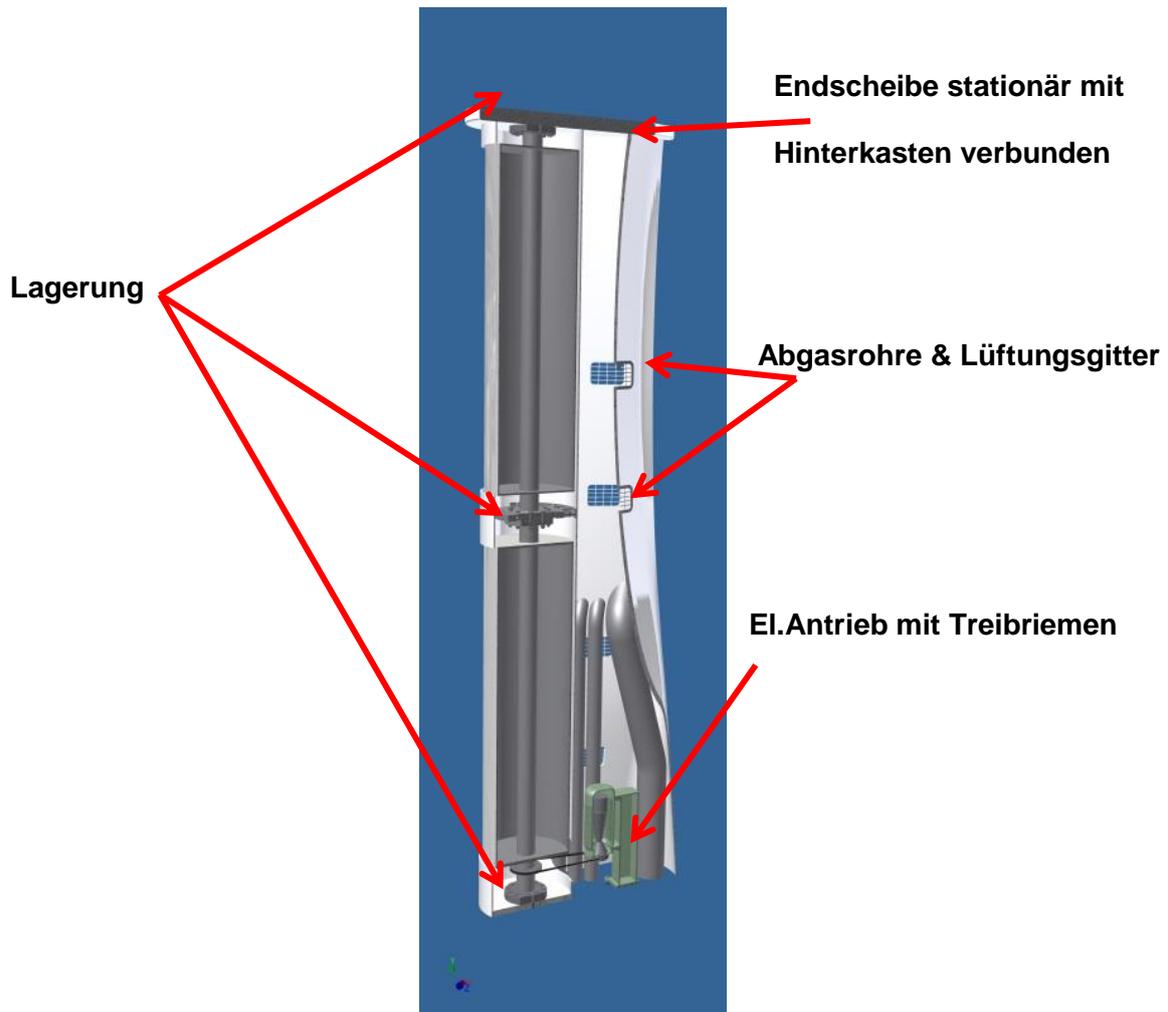


Abbildung 25: 3D-Ansicht eines Rotorprofils

8. Anwendungsbeispiele mit verschiedenen innovativen Schiffsentwürfen

Um in der See-Schifffahrt neue Technologien zu etablieren ist es erforderlich deren Performance durch reale Größen und Vermessungen nachzuweisen und vorführen zu können.

Außerdem müssen neue Produkte für die Schifffahrt vor Ihrer Vermarktung von einer anerkannten Klassifikationsgesellschaft wie z.B. Lloyds Register zertifiziert werden.

Eine mögliche Plattform um diese Segeltechnologie und die Prototypen zu erproben und zu zertifizieren wäre das Offshore-Versorgungsschiff „LEV TORNADO“ welches von der INNOVEN MARINE SERVICE GmbH & CO KG betrieben wird.

Hauptabmessungen: Schiffslänge 47.5 m, Breite 9.15m, Tiefgang 3.4 m

Dieses Schiff benötigt aufgrund seines Einsatzes als Arbeitsschiff in Nord und Ostsee keinen Segelantrieb sondern würde nur als Testplattform temporär genutzt werden. Das heißt der Segelantrieb muß demontierbar ausgeführt werden.

Die folgenden Bilder zeigen wie so ein Umbau des Schiffes aussehen könnte.



Abbildung 26: Anwendungsbeispiel 1 (LEV TORNADO)

Allerdings wäre ein Schiffsneubau gegenüber dem temporären Umbau eines Schiffes die bevorzugtere Plattform für den Prototypenbau, die Erprobung und Zertifizierung.

Gründe hierfür sind zum einen, daß die Segeleinrichtungen nicht zurückgebaut werden müssten und zum anderen, daß in einem Neubau ein komplett in sich schlüssiges Gesamtkonzept das die Schiffsform, den Hauptantrieb und Propeller etc. mit einbezieht, realisiert werden könnte. Dadurch werden die Messergebnisse insgesamt praxisnaher realistischer und besser ausfallen als auf einem umgebauten Schiff.

Hierfür und wegen Nachfragen aus Schifffahrtskreisen hat INNOVEN einige innovative Schiffsvorentwürfe entwickelt, um zu veranschaulichen wie Anwendungsbeispiele für die Rotorprofile als Windzusatzantrieb aussehen könnten.



Abbildung 27: Anwendungsbeispiel 2 (Entwurf für einen innovativen Multipurpose Frachtsegler (INNOVEN))

Unter dem Projektnamen „Cargo Sailer“ wurde ein innovativer Frachtsegler entworfen mit speziellem Segelpropeller und einer Segelfläche die je nach Fahrtgebiet ein Treibstoffeinsparpotenzial bis zu 40 % ermöglicht. Gleichzeitig hat das Schiff wegen seiner max. Air Draught von 39 m keine Einschränkungen im Hafenbetrieb sowie sehr große Ladeluken usw.

Vorl. Hauptabmessungen : Länge 150 m

Breite 24 m,

Tiefgang ca. 8 m,

Tragfähigkeit ca. 12000 tdw

Neben den Entwicklungen in Frachtschiffsbereich wurden auch Konzepte für eine nachhaltige Kreuzschiffahrt untersucht.

Hierbei wurden unterschiedliche Rumpfkonzepete von Einrumpfvarianten über Katamaran und Timaran-Konzepete untersucht um die notwendige Segelfläche unterbringen zu können und gleichzeitig den Passagier Comfort sicherzustellen.

Der Vorteil eines Kreuzfahrtschiffes für den Ersteinsatz des Rotorprofles wäre u.a. die größere Öffentlichkeitswirksamkeit verglichen mit einem Frachter.





Abbildung 28: Anwendungsbeispiel 3 (Entwürfe für innovative Segel-Kreuzfahrtschiffe Trimaran und Monohull-Entwurf (INNOVEN))



Abbildung 29: Anwendungsbeispiel 4 (Extremer Monohull-Entwurf mit speziell für den Segelbetrieb optimiertem Unterwasserschiff (INNOVEN))

Entwurfsziel war ein zukunftsweisender Kreuzliner der als High-Tech-Segler die Weltmeere befährt und mindestens 50 % Treibstoff im Vergleich zum heutigen Stand der Technik erreicht.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Förderprojektes konnten die Grundlagen für eine zukunftsweisende Segeltechnologie in der kommerziellen Seeschifffahrt erarbeitet werden.

Zunächst wurden Bewertungskriterien für Windzusatzantriebe, die in der Berufsschifffahrt eingesetzt werden sollen, entwickelt. Hierbei wurden nicht nur die Segeleigenschaften und das theoretisch mögliche Treibstoff-Einsparpotenzial bewertet, sondern auch weitere für den Schiffsbetrieb relevante Parameter wie Sicherheit, Wartungsaufwand, notwendiger Personalbedarf bzw. Automatisierungsfähigkeit des Segel Systems, Platzbedarf an Deck sowie mögliche Einschränkungen im Hafenbetrieb des Schiffes. Ziel war hierbei eine möglichst praxisnahe Aussage über die Eignung der bekannten Segelsysteme für den kommerziellen Schiffsbetrieb zu erhalten.

Aus der Analyse in Kapitel 1 geht eindeutig hervor, daß der bekannte Flettner-Rotor insgesamt die besten Eigenschaften für den Einsatz in der Berufsschifffahrt aufweist. Allerdings geht aus der Analyse auch hervor, daß die sogenannten "Am Wind-Eigenschaften" maßgebend für das Treibstoffeinsparpotential eines Windzusatzantriebes sind. Die besten "Am Wind-Eigenschaften" weist jedoch ein Profilsegel auf und nicht der bekannte Flettner Rotor. Außerdem benötigt der Flettner Rotor zu seiner Funktion eine nicht unerhebliche Antriebsleistung, die wiederum das Treibstoffeinsparpotenzial verringert.

Aufgrund dieser Fakten erscheint **eine Kombination** der guten "Am Wind Eigenschaften" des Profilsegels mit den positiven Eigenschaften des Flettner Rotors bei gleichzeitig optimiertem Leistungsbedarf die **ideale** Segelmaschine für die Schifffahrt zu sein.

Im Folgenden wurde mit Hilfe von CFD Berechnungen versucht, die Gleitzahlen (und damit die "Am Wind-Eigenschaften") des Flettner Rotors zu verbessern. Hierbei zeigte sich, daß ein sogenannter Profilhinterkasten, welcher den Rotor ergänzt, die besten Ergebnisse liefert.

Bei dem so entstandenen Rotorprofil bildet der Rotor die rotierende Nase des Profils. Um die Antriebsleistung des Rotors zu optimieren, wurde die Endscheibe als nicht rotierend - also stationär - an dem Profilhinterkasten befestigt ausgeführt. Weiterhin soll der Rotor am Hinterkasten gelagert und angetrieben werden. Dadurch entfällt eine Tragsäule im Inneren des Rotors und dieser kann als geschlossenes Volumen ausgeführt und gleichzeitig der Lagerdurchmesser verkleinert werden. Diese Maßnahmen verringern sowohl die Luftreibung als auch die Lagerverluste. In der Summe sollte lt. Berechnungen die Antriebsleistung des Rotorprofiles nur noch ca. 50 % des herkömmlichen Flettner Rotors betragen.

Nachdem unterschiedliche Varianten des Rotorprofiles berechnet waren, wurde ein Windkanalmodell entwickelt mit dem die wesentlichen Berechnungsergebnisse verifiziert werden sollten.

Am 15. und 16. Oktober 2013 wurden die Messungen im Windkanal der EADS/Airbus in Bremen durchgeführt. Zusammenfassend ist festzustellen, daß die sehr positiven

aerodynamischen Berechnungsergebnisse für das Rotorprofil in vollem Umfang bestätigt wurden.

Somit steht für die moderne Berufsschiffahrt erstmals eine optimale Segeltechnologie als Windzusatzantrieb für die Treibstoffeinsparung zur Verfügung.

Im Folgenden werden die Hauptvorteile dieser neuen Segeltechnologie im Vergleich zu bekannten Systemen in komprimierter Form gegenübergestellt:

1. Treibstoffeinsparungen können schon bei Am Wind Kursen ab 40 Grad erzielt werden. Durch den gleichzeitig ca. halbierten Antriebsleistungsbedarf des Rotors wird das Treibstoffeinsparpotenzial bei gleichen Windbedingungen um **30 bis 40 Prozent** (je nach Betriebsbedingungen) zum herkömmlichen Flettner Rotor **gesteigert**.
2. Das neue Segelsystem ist vollkommen automatisierbar und erfordert **keinen** zusätzlichen Personaleinsatz (Crew). Das wird bei Tuchsegelsystemen auch oft angekündigt ist aber im tägl. Dauerbetrieb selten zuverlässig umsetzbar.
3. Die erforderliche Segelfläche beträgt nur **ca. 25 % der Fläche** von Tuchsegeln bei gleichem Leistungspotenzial. Dadurch verringert sich der Bedarf an Decksfläche und die Gesamthöhe des Schiffes über Wasser (Airdraught) kann leichter unterhalb 40 Meter gehalten werden. Beides führt generell zu erheblich weniger Einschränkungen und Behinderungen im Hafenebetrieb der Schiffe durch das Segelsystem.
4. Die Schiffs-Sicherheit wird durch das Rotorprofil keinesfalls beeinträchtigt. In kritischen Situationen, sei es bei Sturm oder Fehlfunktion des Systems, kann jederzeit, wie beim Flettner-Rotor ein "Fail Safe Stop" durch Unterbrechung der Energiezufuhr gewährleistet werden. D.h. hierfür ist kein Personalbedarf notwendig, es müssen keine Segeltücher geborgen oder Profile aktiv aus dem Wind gedreht werden usw.
5. Der Wartungsaufwand für das Rotorprofil wird als äußerst gering eingeschätzt, da alle Komponenten für die gesamte Lebensdauer ausgelegt werden. Es müssen keine Segeltücher oder Seile ausgetauscht werden. Die planmäßige Wartung wird vom technischen Schiffpersonal miterledigt. Da es sich um "konventionellen" Maschinenbau handelt, sind keine Spezialkenntnisse erforderlich. Dadurch sind die Kosten der Wartung für die gesamte Betriebsdauer gut kalkulierbar und es besteht **nicht** die Gefahr von Ausfallzeiten für das Schiff um Komponenten des Segelsystems von Spezialpersonal austauschen zu müssen.
6. Der Hinterkasten des Rotorprofils beinhaltet die Lagerung und den Antrieb für den Rotor. Er ist starr mit der Struktur des Schiffskörpers verbunden, d.h. verschraubt oder verschweißt. Dadurch ist der Hinterkasten auch wegen seiner Größe geeignet, um zusätzlich z.B. Lüftungskanäle und/oder Abgaskanäle usw. aufzunehmen. Die stehende Endscheibe dient als Geräteträger für Antennen und Navigationslichter usw. Das bedeutet das Rotorprofil ist sehr gut in den Schiffskörper integrierbar und ersetzt teilweise Masten (Geräteträger) und Schornsteine/ Maschinenschächte, was im Vergleich zum herkömmlichen Flettner Rotor einen signifikanten Kostenvorteil bedeutet.

Abschliessend wurden bei INNOVEN verschiedene Schiffsvorentwürfe entwickelt, welche diese neue Segeltechnologie nutzen könnten. Unabhängig davon ob derartige Projekte zeitnah umgesetzt werden können, halten wir es für sehr notwendig, die praktische Erprobung dieser neuen Segeltechnologie in realer Größe voranzutreiben.

Wegen der oben genannten wirtschaftlichen Vorteile gegenüber bekannten Segelsystemen könnte sich hieraus ein weitverbreitetes Produkt für die kommerzielle See Schifffahrt entwickeln.

Bremerhaven im Juli 2014

Dipl.-Ing. Rolf Rohden