

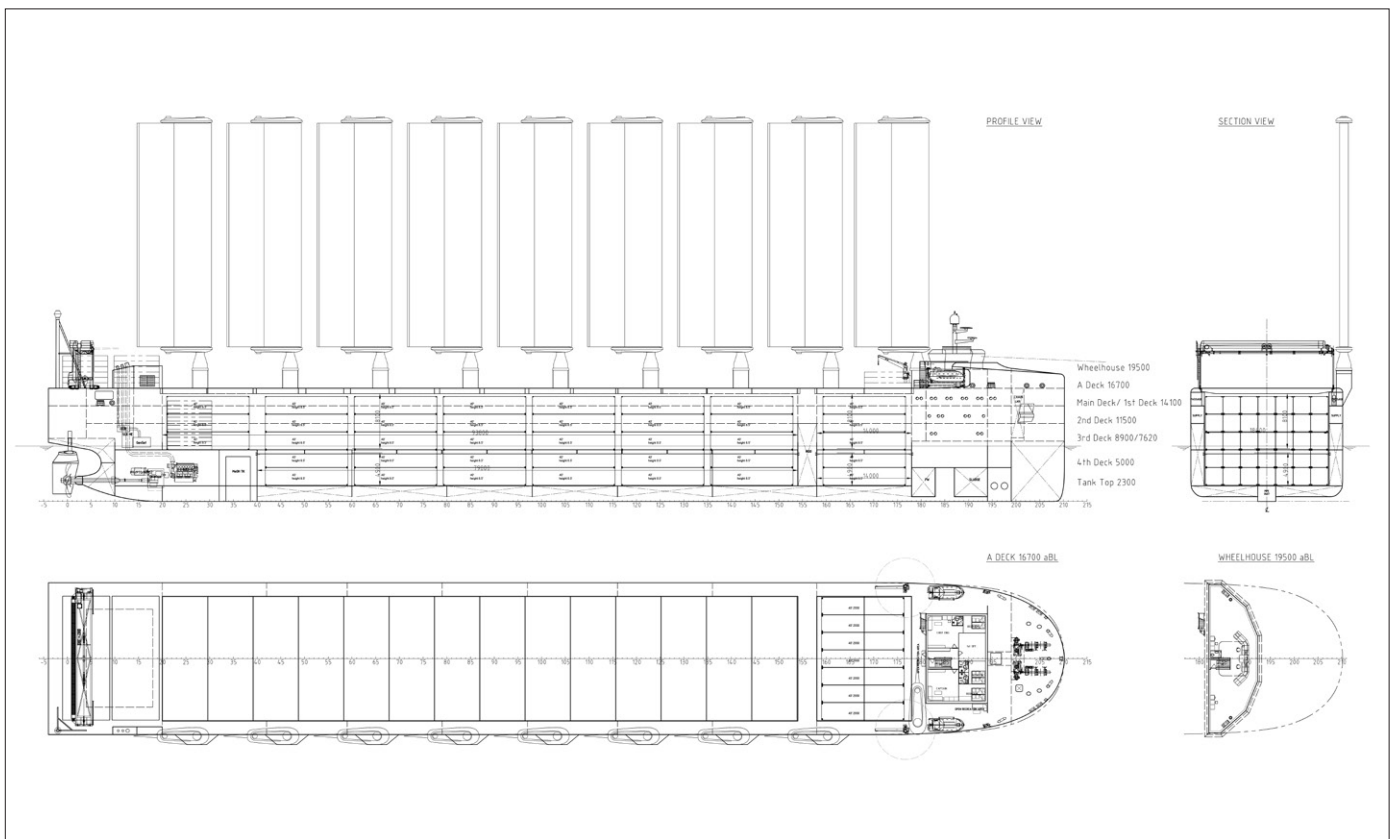


Abb. 1: Konzeptentwurf eines Frachtseglers im Projekt rasant, Generalplan

Quelle: Technolog Services GmbH, Detlev Löll Ingenieurbüro GmbH

Marktfähiger Frachtsegler mit Hybridantrieb kombiniert Wirtschaftlichkeit und maritimen Klimaschutz

rasant Das Forschungsprojekt rasant entwickelt einen innovativen Frachtsegler mit Segel-Hybridantrieb, der Wirtschaftlichkeit und maritimen Klimaschutz verbindet. Erste Ergebnisse zeigen, dass ein solcher Multipurpose Carrier auf transatlantischen Routen eine technisch realisierbare und wirtschaftlich attraktive Alternative zum konventionellen Schiffsantrieb darstellt.

Michael Vahs, Nils Bahr, Jingjing Luo, Felix Agostini

Für das Projekt Frachtsegler mit alternativen Antrieben (Akronym: rasant) sind am 2. April 2025 erste Forschungsergebnisse und ein zukunftsweisender Schiffsentwurf vorgestellt worden.

Im Maritimen Technikum der Hochschule Emden/Leer diskutierte das Projektkonsortium (Hochschule Emden/Leer, Hochschule Flensburg, Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES,

MARIKO GmbH) die Ergebnisse der ersten Projektphase mit assoziierten Projektpartnern und weiteren Beteiligten. Die Konstruktionsbüros Technolog Services GmbH aus Hamburg und Detlev Löll Ingenieurbüro GmbH aus Kiel waren im Rahmen des Projektes mit der Entwicklung eines Konzeptentwurfs beauftragt worden. Die Rörd Braren Bereederungs-GmbH & Co. KG aus Kollmar begleitete die Entwicklungsarbeiten mit

ihrer Expertise für den sowohl wirtschaftlichen als auch umweltfreundlichen Betrieb von Schiffen. Der Entwurf eines ca. 13 000 tdw tragenden Multipurpose Carriers (MPC) sollte insbesondere für den Frachtmarkt im Nord- und Südatlantik sowie Mittelmeer optimiert werden. Eine übergeordnete Zielsetzung des Schiffsentwurfs war die Vereinbarkeit von Wirtschaftlichkeit mit Klimaschutz. Das Schiff sollte hervorragende Eigenschaften der

Ladefähigkeit aufweisen sowie einen Lösungsvorschlag für die Herausforderung der benötigten Antriebsenergie in Bezug auf Emissionseinsparungen und Energiekosten aufzeigen. Die bisherigen Ergebnisse der Studie zeigen, dass ein Schiff mit relativ großer Segelleistung auf geeigneten Routen nicht nur technologisch einen innovativen Weg aufzeigt, sondern im Vergleich zu anderen Zukunftstechnologien auch wirtschaftlich eine sehr attraktive Alternative darstellt.

Das noch bis Mitte 2026 laufende Kooperationsprojekt verbindet die Perspektiven und Expertisen von maritimen Forschungseinrichtungen und Unternehmen der maritimen Industrie (Reedereien, Werften, Konstruktionsbüros, Klassifikationsgesellschaften) sowie dem Verband Deutscher Reeder. Das Projekt wird im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie mit insgesamt 2,9 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Verkehr gefördert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (PtJ) umgesetzt.

Konzept und Schiffsentwurf

Als Grundlage der Planung dienten Schiffs- und Reisedaten eines am Markt erfolgreich eingesetzten Multipurpose Carriers der Röd Braren Bereederungs-GmbH & Co. KG mit einer Ladekapazität von 10 000 tdw. Eine Marktanalyse führte zu der Erwartung, dass zukünftig eine etwas größere Kapazität von ca. 13 000 tdw stärker am Multipurpose-Chartermarkt auf Routen des Nord- und Südatlantiks einschließlich Mittelmeer nachgefragt sein wird. Als Dienstgeschwindigkeit wurden 12 kn festgelegt unter Berücksichtigung eines Sea Margin mit Leistungsreserven für Windstärke 5 und den dazugehörigen charakteristischen Seegangsverhältnissen. Für die Dienstgeschwindigkeit sollte eine Reichweite von 8000 Seemeilen unabhängig vom Segelantrieb erreicht werden können. Neben Projektladungen und Schüttgütern sollten auch Container geladen werden können, insbesondere in Erfüllung der Vorschriften für Gefahrgut. Dazu wurde neben einem ca. 90 m langen, für Projektladung optimierten Laderaum ein zweiter kleiner Laderaum für 20' und 40' Container vorgesehen. Diese Raumaufteilung verbessert insbesondere auch die Leckstabilität des Entwurfs. Beide Laderäume verfügen über Zwischendecks

und werden mit Ponton-Lukendeckeln ausgerüstet. Die Deckel sollen von einem auf Schienen fahrenden Gantry-Kran bewegt und gestaut werden. Die Zwischen-deck-Pontons können ebenfalls flexibel als Querschotten zur Laderaumunterteilung, z.B. für Bulk-Ladungen, eingesetzt werden.

Als Ziel wurde eine Segelleistung von durchschnittlich mindestens 50 Prozent der gesamten Vortriebsleistung festgelegt. In Abgrenzung zu Schiffen mit Windzusatzantrieb ergibt sich eine Umkehr der Begrifflichkeiten. So kann man im vorliegenden Fall das Segelsystem als Hauptantrieb und den Motorantrieb als Redundanzantrieb oder Zusatzantrieb betrachten. Das Gesamtsystem wird auch als Segel-Hybridantrieb bezeichnet. Da sich dieser schiffbauliche Bereich jedoch derzeit erst entwickelt, gibt es noch keine allgemein festgelegten und rechtsverbindlichen Begrifflichkeiten. Ein Frachtsegler muss weiterhin alle Anforderungen eines Motorschiffs erfüllen, kann jedoch in einem Segelbetriebsmodus fahren, der ggf. das Kriterium „Segelschiff“ im seeverkehrsrechtlichen Sinne erfüllt [6].

Für die Auslegung des Redundanzantriebs sollte ein klimaneutraler Kraftstoff gefunden werden, der antriebstechnisch bereits erprobt ist und im festgelegten Fahrtgebiet auch in Kürze verfügbar sein wird. Ebenso müssen die Bedingungen der Wirtschaftlichkeit erfüllt werden. Die Auswahl fiel auf grünes Methanol.

Der Schiffsentwurf verfügt in der vorliegenden Variante über keine Bordkräne. Diese hätten zwar die Einsatzflexibilität

Length (o.a.)	149.95 m
Beam (mld.)	22.40 m
Depth (main deck)	14.10 m
Draught (design/max)	8.20 m / 8.70 m
Tonnage	13 110 gt
Deadweight	13 600 t
Container capacity	496 TEU
Cargo hold volume	24 580 m³
Air draught (ballast condition)	52 m

Tabelle 1: Hauptabmessungen

erhöht, z.B. für Ladeplätze ohne Hafenkräne, aber gleichzeitig erhebliche Einschränkungen für die Installation von Segelsystemen verursacht.

Die Kammerkapazität wurde für 18 Personen ausgelegt. Zusätzliche Kammern für Auszubildende sind vorgesehen. Der Entwurf des Brückenaufbaus muss insbesondere die regulatorischen Anforderungen für die Sicht von der Brücke (SOLAS, Kap. V, R.22) erfüllen und zugleich aerodynamisch auf das Segelsystem abgestimmt werden. Dies führt in der Regel zu einem relativ flachen, vorne angeordneten Aufbau. Ein kostengünstiger und besser vor Seegangseinwirkung geschützter Aufbau im Heckbereich wäre denkbar, wenn andere technische Lösungen zur Gewährleistung der Ausguckfunktion alle Anforderungen der Klassifikation und Flaggenstaatsadministration erfüllen und zugelassen werden. Im Zuge der fortschreitenden Schiffsautomatisierung, insbesondere im Hinblick auf eine autonome Schifffahrt, ist dies zukünftig zu erwarten und schafft zusätzliche Freiheiten im Schiffsentwurf.

Segelantrieb

Für die Auswahl eines geeigneten Segelantriebs wurden zunächst Leistungskriterien festgelegt und weitere operative Bedingungen aufgestellt. Das Segelsystem sollte

- › mindestens 50 Prozent der benötigten Antriebsleistung für die festgelegten Routenprofile im Jahresdurchschnitt beitrage,
- › bereits entwickelt und erprobt worden sein, sowie von Ausrüstern angeboten werden,
- › den Lade- und Löschbetrieb nicht oder nur sehr gering beeinträchtigen,
- › hochautomatisiert arbeiten,
- › ein sicheres und robustes Betriebsverhalten aufweisen,
- › gute wirtschaftliche Kennwerte aufweisen, z.B. nachgewiesen durch das Verhältnis aus Einsparungen zu Investitions- und Betriebskosten.

Im Rahmen der Arbeiten wurde ein Bewertungstool für die Auswahl von Segelsystemen entwickelt. Es zeigte sich jedoch, dass nicht alle Hersteller die gewünschten Daten und Informationen zu den angebotenen Systemen liefern konnten, ein Anzeichen für ein technologisch frühes Marktstadium. Für die weitere Verbreitung von Windantriebstechnologien sind jedoch gerade validierte Leistungs- >

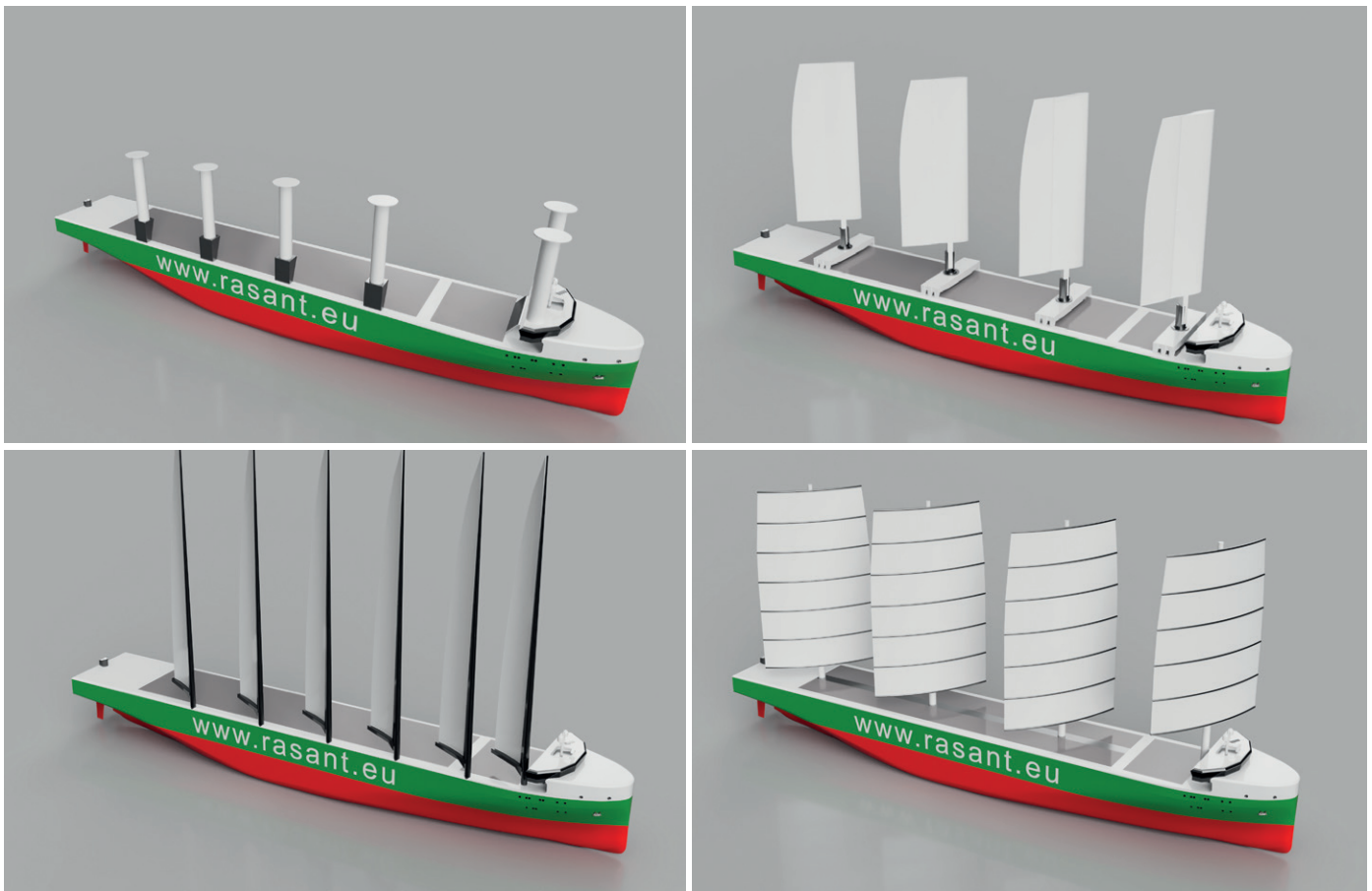


Abb. 2: Variantenstudie mit verschiedenen Segelkonzepten

Quelle: Hochschule Emden/Leer

kennwerte und operative Eigenschaften sehr wichtig für die Investitions- und Auswahlentscheidungen von Reedereien.

Grundsätzlich kommen verschiedene Segelsysteme für den vorgestellten Entwurf in Frage. Flettnerrotoren liegen in Bezug auf die technologische Reife, die einfache Automatisierbarkeit, das sichere Betriebsverhalten und Wirtschaftlichkeit weit vorne. Ein ähnliches Ergebnis wird für sogenannte Suction Wings, feste Flügel mit aktiver Grenzschichtabsaugung, erwartet. Die Leistungsdaten, z.B. aus Windkanaluntersuchungen und Messungen im Schiffsbetrieb, sind jedoch unsicherer als bei Flettnerrotoren. Suction Wings standen dem Projekt auch nicht in der gewünschten Größe zur Auswahl. Zugdrachensysteme konnten die formulierten Anforderungen in diesem Projekt nicht erfüllen und wurden nicht näher betrachtet. Passive Wingsails, große textile oder feste Flügelsegel, wurden ebenfalls bewertet. Diese Segel sind insbesondere geeignet, wenn das Routenprofil eine gute Leistung „am Wind“ oder „vor dem Wind“ erfordert. Textile Segel haben gegenüber festen Wingsails den Vorteil

einer einfachen Refffunktion zur Reduktion der Segelfläche bei zunehmender Windgeschwindigkeit. Diese Funktion ist insbesondere für ein sicheres Betriebskonzept erforderlich. Ein grundsätzliches Risiko von Segeltechnologien ist das Überschreiten zu großer Windlasten und somit die Gefährdung der Kenterstabilität von Schiffen oder die Gefahr von Schäden am Segelsystem. Moderne Segelsysteme sollten daher über eine sichere Depowering-Funktion verfügen, die auch mit kurzer Reaktionszeit und unter widrigen Wetterbedingungen funktioniert. Eine Absicherung gegen Black-outs sollte ebenfalls gegeben sein. Bei dieser betrieblichen Eigenschaft unterscheiden sich die Systeme sehr deutlich, und es liegt nur wenig Erfahrung aus dem tatsächlichen Einsatz der Systeme unter diesen Bedingungen vor. Die Erfahrungen aus dem Einsatz von bisher relativ kleinen Systemen als Windzusatzantrieb sind nur begrenzt übertragbar auf zukünftige Schiffe mit großer Segelleistung. Assistenzsysteme zur Überwachung eines sicheren Einsatzes und gleichzeitig zur Optimierung der Segelleistung stellen einen Lösungs-

ansatz für diese operative Aufgabe dar und sind Teil des Forschungsprojektes.

Für den Entwurf des 13 000 tdw MPC-Frachtsegler wurde schließlich das Wingsail-System des französischen Entwicklers OceanWings ausgewählt. Insbesondere die baulichen Abmessungen kamen dem Ziel eines freien Wetterdecks zur Nutzung für Decksladung entgegen. Die Bewertung fast aller Kriterien fiel gut aus. Bei den Investitions- und Instandhaltungskosten konnte noch kein finaler Nachweis erfolgen. Sie werden jedoch höher eingeschätzt als bei aktiven Segelsystemen (Flettnerrotoren, Suction Wings). Bis zu neun Masten mit einer jeweiligen Segelfläche von 363 m² können auf dem Schiff gemäß Entwurf installiert werden. Auf vielen der betrachteten Routen kann das Einsparziel von mindestens 50 Prozent Kraftstoff per Routensimulation erzielt werden. Die guten Stabilitätseigenschaften des Schiffsentwurfs lassen die Fahrt unter vollen Segeln bis einschließlich Beaufort 5 zu. Das Konzept ist jedoch modular aufgebaut, sodass Reedereien auch weniger Masten und Segelfläche vorsehen können. Mithilfe einer Routen-

analyse, die Kriterien der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt, können optimale Konfigurationen für die jeweiligen Anforderungen von Reedereien gefunden werden. Das dafür entwickelte Analyse-Tool SimShip wurde bereits im Projekt genutzt und wird derzeit weiterentwickelt.

Hybrider Redundanzantrieb

Auch für Phasen, in denen die aktuell zur Verfügung stehende Windenergie nicht ausreichend für den Antrieb bzw. die Einhaltung der Dienstgeschwindigkeit ist, sollte ein weitestgehend klimaneutraler Betrieb des Schiffes sichergestellt werden können. Dementsprechend galt es einen maschinellen Redundanzantrieb zu finden, der mit klimaneutraler Energie betrieben wird und die geforderte Reichweite von 8000 Seemeilen windunabhängig erzielen kann. Reine batterieelektrische Antriebe schieden mangels Speicherkapazität und hoher Kosten aus, wurden

jedoch als Bestandteil eines auf grünen Kraftstoffen basierenden Antriebs einbezogen. Es wurden Brennstoffzellensysteme und Verbrennungsmotoren, die mit klimaneutralen Kraftstoffen betrieben werden können, betrachtet. Bei der Analyse wurden neben Effizienz und Kosten auch das Readiness Level in Bezug auf die Technologieentwicklung, Markteinführung sowie Regulatorik betrachtet.

Bereits in der Ausgangslage wurden aktuelle sowie die zukünftig zu erwartende Verfügbarkeit sowie Kostenstruktur von klimaneutralen Kraftstoffen für die festgelegten Routenprofile innerhalb einer beauftragten Studie analysiert [2]. In der Gesamtbetrachtung erhielt grünes, auf Wasserstoff basierendes Methanol die höchste Bewertung. Trotz der vergleichsweise hohen Energieeffizienz von Brennstoffzellen wurde eine Kombination aus Methanol-Verbrennungsmotor (2400 kW, Dual-Fuel) und batterieelektrischer

OSWALD
POWER TO MOVE

CUSTOM-BUILT MOTORS

*energy-saving &
environmentally friendly*



MAIN PROPULSION

100 – 3000 KW | 100 – 600 RPM



PM THRUSTER

100 – 3000 KW | 600 – 1800 RPM



PM GENERATOR

100 – 2000 KW | 1000 – 2300 RPM

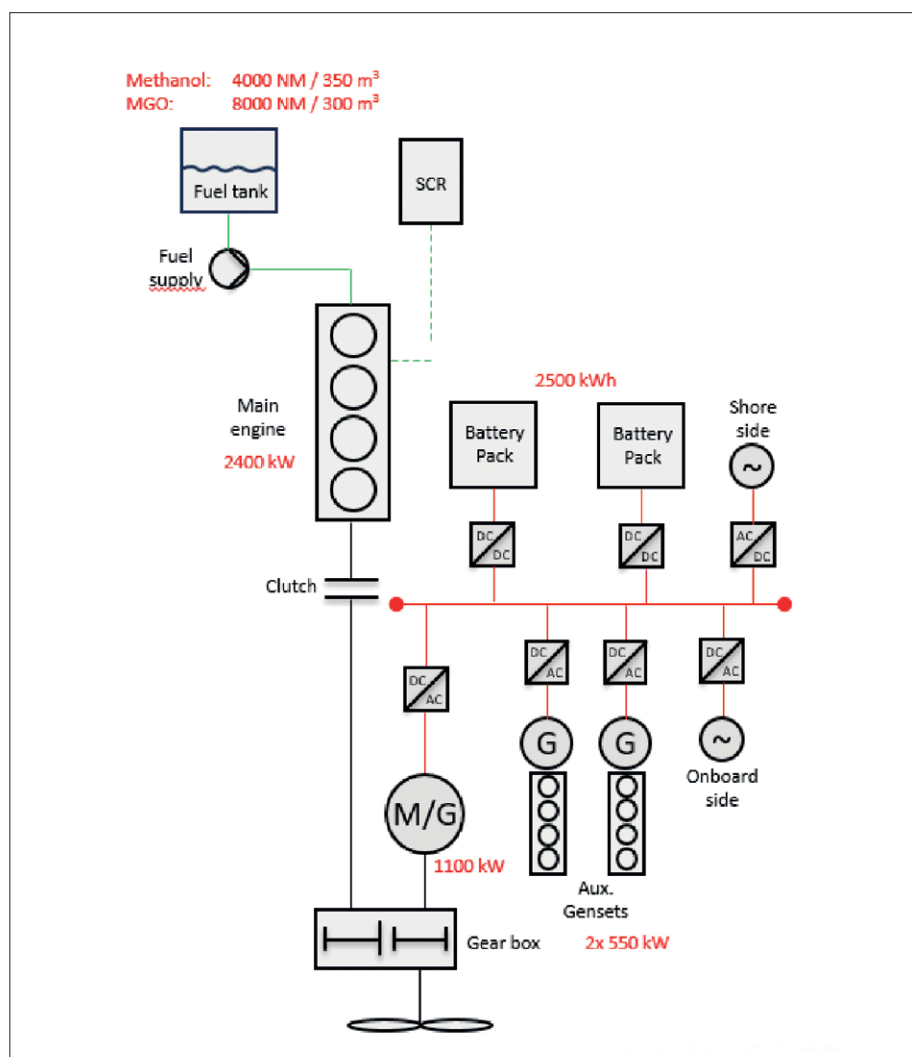


Abb. 3: Schematischer Aufbau des parallelen Hybridantriebs

Quelle: MZH Flensburg

Oswaldstraße 1
D-63897 Miltenberg
oswald@oswald.de
+49 9371 9719 0
www.oswald.de



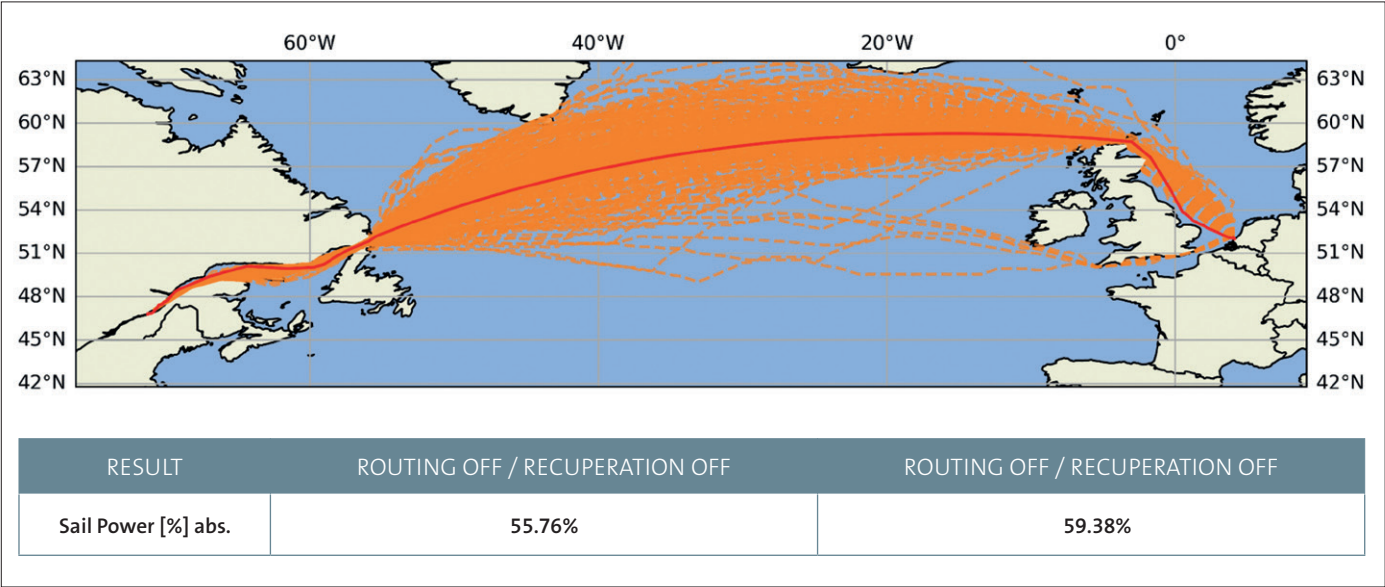


Abb. 4: Simulationstool Simship zur Untersuchung von verschiedenen Antriebsvarianten und -konfigurationen

Einheit (PTO/PTI/PTH) ausgewählt. Ein elektrischer Zusatzantrieb (1100 kW) mit einer Batteriekapazität von 2500 kWh kann für kurze Strecken (Hafen und Revier) einen emissionsfreien Antrieb gewährleisten und bietet Power take home (PTH)-Eigenschaften. Falls erforderlich kann der Elektromotor mit seiner Zusatzleistung auch die Schiffsgeschwindigkeit erhöhen (PTI) oder in Umkehrfunktion als Wellengenerator den Hilfsbetrieb versorgen und die Batterien aufladen (PTO). Die PTO-Funktion kann auch im Segelbetrieb zur Rekuperation genutzt werden und zu signifikanten Effizienzsteigerungen beitragen, wie in der Routensimulation nachgewiesen werden konnte.

Die Routensimulation unterstützte ebenfalls die Entscheidung über die detaillierte Konfiguration des Antriebs und Hilfsbetriebs. Da Teillastzeiten nur einen relativ geringen Zeitraum einnehmen, erzielt eine parallele Anordnung von Verbrennungsmotor und Elektromotor im Durchschnitt höhere Effizienzwerte und schnitt in der KPI-Bewertung am besten ab. In der Parallelanordnung wirkt der Methanol-Motor (Dual-Fuel) gemeinsam mit dem Elektromotor auf ein Hybridgetriebe, welches die Propellerwelle mit einem Verstellpropeller (CPP) antreibt.

Hydrodynamik

Einen besonderen Schwerpunkt bildet die hydrodynamische Optimierung des Entwurfs in Bezug auf die Besonderheiten des Segelbetriebs. Während bei Motorschiffen seitlich auf den Schiffskörper

wirkende Windkräfte nur eine marginale Rolle im Entwurf spielen, können die Querkräfte des Segelsystems einen erheblichen Einfluss auf Schiffswiderstand, Gierstabilität und Manövrierverhalten haben. Segelyachten werden in der Regel mit Flossenkielen ausgerüstet, um die Segelleistung und das Fahrverhalten zu optimieren. Diese Option würde bei Frachtseglern zu einem hohen Aufwand mit entsprechenden Kosten führen, da der Kiel aus Gründen der Tiefgangbeschränkung häufig durch eine Klapp- oder Hubfunktion eingefahren werden müsste. Die Entwurfsaufgabe besteht darin, den Kielbereich des Schiffes so zu optimieren, dass im Segelbetrieb Driftwinkel, Giermoment und Widerstand unter Einhaltung einer günstigen Kostenstruktur minimiert werden. In der ersten Phase der Entwurfsarbeiten wurden relativ konventionelle Linien mit einem baulich einfachen Kielkasten (Balkenkiel) gewählt. Im nächsten Schritt sollen weitere Varianten untersucht und verglichen werden, u.a. die Integration sogenannter Wagner-Kiele [7] sowie die Auswirkung einer leichten Aufkimmung gegenüber einem konventionellen Flachboden.

Auch das Ruder muss in Bezug auf die Kompensation von Drift und Giermomenten optimiert werden. Hier steht vor allem die Frage im Fokus, ob ein Mittelruder in konventioneller Anordnung hinter dem Propeller auch bei großer Segelleistung die Anforderungen ausreichend erfüllen kann. Im jetzigen Entwurfsstadium wird ein sogenanntes „Gate Rudder“ vor-

gesehen, mit zwei Rudern, die beidseitig neben dem Propeller angeordnet sind. Bisherige Erfahrungen mit diesem Ruder haben bei konventionellen Motorschiffen signifikante Einsparungen und eine Verbesserung des Manövrierverhaltens ergeben [4].

Laderaum und Ladungseinrichtungen

Eine besondere Zielsetzung der Rörd Braren Bereederungs-GmbH & Co. KG war die Schaffung eines großen Laderaums mit flexiblem Zwischendeck und großer Decksladefläche auf dem Wetterdeck. Dieses wichtige Entwurfsziel ließ sich jedoch aus Platzmangel und aerodynamischen Gründen nicht mit der Ausrüstung von Bordkränen kombinieren. Daraus folgt die Notwendigkeit, dass ein Frachtsegler dieser Bauart mit hohem Segelpotenzial nicht für alle Transportaufgaben eines MPC eingesetzt werden kann, z.B. in Häfen ohne Kräne. MPCs ohne Kräne sind jedoch am Markt sehr üblich und können erfolgreich eingesetzt werden. Sollten jedoch Kräne eine unabdingbare Anforderung sein, kann der Entwurf entsprechend angepasst werden. Die Installation von Kränen würde zu einer Reduktion der installierten Segelleistung führen.

Der vorliegende Entwurf erfüllt trotz der Installation eines großen Segelsystems wesentliche Anforderungen an einen leistungsfähigen MPC. Es können insgesamt 50 TEU im vorderen Laderaum gestaut werden. Der hintere große Laderaum kann 446 TEU aufnehmen, sodass sich eine Gesamtkapazität von 496 TEU ergibt. Der

hintere Laderaum ist jedoch mit einer Länge von 93,8 m für Projektladung optimiert. Das Zwischendeck bietet 1725 m² Ladefläche, der Unterraum 1330 m². Die Zwischendeck-Pontondeckel können wahlweise als Querschotten zur Separierung des Laderaums genutzt werden. Das Wetterdeck bietet eine Fläche von 2344 m² für den Stau von Projektladung.

Stabilität

Durch das Segelsystem wirken erhebliche Querkkräfte und krängende Momente auf das Schiff im Fahrbetrieb. Zum einen sollte ein bestimmter statischer Krängungswinkel im Normalbetrieb nicht überschritten werden, um zusätzliche Störfaktoren zu vermeiden, z.B. für die Arbeitssicherheit und den Komfort der Besatzung. Zum anderen muss die Stabilität ausreichend sein, um eine Kentergefahr bei plötzlich auftretenden Wetterverschlechterungen oder Manövern (z.B. Drehkreis) auszuschließen. Die für alle Schiffe in der internationalen Fahrt geltenden Vorschriften der IMO (Intact Stability Code 2008) sehen keine Kriterien für Schiffe mit Segelantrieb vor. Im Rahmen der Klassifikationsvorschriften erfolgt jedoch eine Prüfung der Stabilität mit Zulassung des Stabilitätshandbuchs und Ladungsrechners.

Im Rahmen des rasant-Projektes wurden die Regelwerke verschiedener Klassifikationsgesellschaften und Flaggenstaaten untersucht. Hierbei ergaben sich signifikante Unterschiede – sowohl in den Berechnungsgrundlagen und Annahmen als auch in den zu erfüllenden Kriterien [1]. Eine Überarbeitung und Harmonisierung dieser Verfahren erscheint zwingend notwendig, um einheitliche Standards zu bilden und den Wechsel von Klasse und Flagge nicht zu erschweren. Darüber hinaus werden besondere Eigenschaften von unkonventionellen Segelsystemen noch nicht ausreichend abgebildet, z.B. das unterschiedliche Verhalten der Systeme beim Einfall plötzlicher Böen.

Brücke, Navigation und Assistenzsysteme

Eine besondere Herausforderung beim Entwurf von modernen Frachtseglern ist die Beeinträchtigung der Sichtverhältnisse von der Brücke durch große Segelsysteme. Eine grundsätzliche Lösung ist die Anordnung der Brücke auf dem Vorschiff. Dies führt jedoch in der Regel zu einer Baukostensteigerung. Auch der effektive

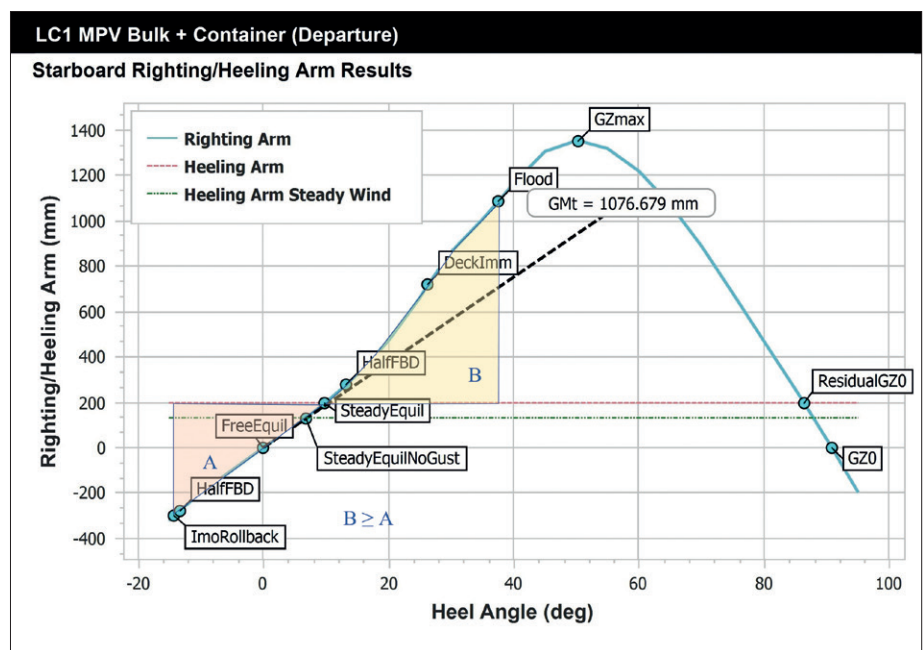


Abb 5: Hebelarmkurve mit Wetterkriterium für einen Beladungsfall Quelle: Hochschule Emden/Leer

Schutz des Brückenhauses vor Seeschlag muss gewährleistet werden, z.B. durch geeignete Wellenbrecher und erhöhte Festigkeiten bei den Brückenfenstern. Dieser Aufwand kommt jedoch auch einer erhöhten Flexibilität bei der Stauung von hoher Decksladung zugute. Zukünftig könnten jedoch auch Kamerasysteme eine verdeckte Sicht von der Brücke kompensieren. Während eine ausreichende Leistungsfähigkeit der Sensorik bereits angenommen werden kann, sind die Zulassungsregeln jedoch noch nicht entsprechend fortgeschritten [5].

Fazit und Ausblick

Noch vor wenigen Jahren fanden Windantriebstechnologien in der kommerziellen Schifffahrt kaum Beachtung. Inzwischen etablieren sich moderne Windantriebe zunehmend in der Frachtschifffahrt, die Orderbücher der Systementwickler und -hersteller füllen sich. Windantriebstechnologien sind ein relevanter Baustein zur Dekarbonisierung der Schifffahrt, die Technologien werden weiterentwickelt und das Marktsegment zeigt in den letzten Jahren einen sehr dynamischen Verlauf. Die verfügbaren Systeme werden größer und leistungsfähiger. Erste Projekte definieren den Segelantrieb bereits als Hauptantrieb mit einem Vortriebsanteil von über 50 Prozent. Es entstehen neue Chancen für die deutsche und europäische maritime Industrie, Vorreiter eines

technologisch und wirtschaftlich relevanten Marktes zu werden und an dieser Stelle nicht ins Hintertreffen zu geraten.

Literatur

- [1] Albers, P. (2025), Intact stability of wind-assisted merchant vessels – A comparative analysis of existing stability criteria and operational stability risks associated with the use of Wind Assisted Propulsion Systems, Master thesis in Maritime Operations, Hochschule Emden/Leer – University of Applied Sciences
- [2] Diehl, L. et al. (2024), Verfügbarkeit alternativer Kraftstoffe – Projekt Rasant Hybrid Sail Cargo Ships, Studie der Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn
- [3] IMO (2008), International Code on Intact Stability, 2008, International Maritime Organisation
- [4] Sasaki, N. et al. (2018), Gate Rudder, University of Strathclyde, Scotland, UK
- [5] Schröder, G. (2025), Einsatz von Kameras zur Erfüllung der Anforderungen der Sicht von der Brücke für Schiffe mit ständigen oder zeitweisen Sichtbeschränkungen, Bachelor Thesis im Studiengang Nautik und Seeverkehr an der Hochschule Emden/Leer
- [6] Vahs, M. et al. (2023), Navigating and Manoeuvring of modern Wind powered Ships – Status and Requirements from a legal and practical View, Proceedings of the 19th International Ship Stability Workshop, 11-13 September 2023, Istanbul, Turkey
- [7] Wagner, S. et al. (2025), Development, Implementation, and Testing of a Hydrodynamic Keel Concept for Modern Wind-Assisted Commercial Ships, Proceedings of the 17th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'25, Tullamore, 5-7 May 2025

Die Autoren

Michael Vahs, Fraunhofer Arbeitsgruppe für Nachhaltige Maritime Mobilität an der Hochschule Emden/Leer, Nils Bahr, Maritimes Zentrum der Hochschule Flensburg, Jingjing Luo, Fraunhofer Arbeitsgruppe für Nachhaltige Maritime Mobilität am Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme IWES, Felix Agostini, MARIKO GmbH