# CLEAN

# SCHLUSSBERICHT

Förderkennzeichen: 03SX437B

Verbundprojekt: CLEAN – Energiegewinnung durch die anaerobe Behandlung organischer Reststoffe an Bord von Kreuzfahrtschiffen

Vorhaben: Untersuchung an einer Biogasanlage an Bord eines Kreuzfahrtschiffes

Stefan F. Fahrnholz

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# Inhalt

1 Kurze Darstellung ..... 4
1.1 Aufgabenstellung ..... 4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ..... 7
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ..... 8
1.4 Wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde ..... 10
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 11
2 Eingehende Darstellung ..... 13
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele ..... 13
2.1.1 Konzept zur Energiegewinnung aus Reststoff ..... 13
2.1.2 Potentialanalyse und Zusammensetzung des Schiffsabfalls ..... 13
2.1.3 Anlage für die maritime Anwendung ..... 14
2.1.4 Sicherheitstechnische Bewertung ..... 15
2.1.5 Regulatorische Bewertung ..... 16
2.1.6 Reflektion der Zielerreichung ..... 17
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ..... 19
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ..... 19
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans ..... 20
2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ..... 22
2.6 Veröffentlichung des Ergebnisses ..... 23
3 Literaturverzeichnis ..... 25

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: STRUKTUR UND INHALTE DES CLEAN VORHABENS ..... 6
ABBILDUNG 2: CLEAN ABFALLMANAGEMENT SCHEMA (FAHRNHOLZ, ET AL., 2023) ..... 13
ABBILDUNG 3: CLEAN BIOGASANLAGE IN TESTBETRIEB AN LAND ..... 15

# Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ERWARTETE BIOGASZUSAMMENSETZUNG (FAHRNHOLZ, ET AL., 2023) ..... 14
TABELLE 2: WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES ..... 19

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das CLEAN-Projekt hatte zum Ziel, innovative technologische Lösungen für ein verbessertes Management organischer Reststoffe einschließlich deren energetischer Nutzung an Bord von Kreuzfahrtschiffen zu entwickeln und umzusetzen. Im Mittelpunkt stand der Einsatz moderner Anaerobtechnik. Während diese an Land als sehr erprobter Ansatz zur Stabilisierung und Hygienisierung organischer Reststoffe schon galt, wird sie bisher an Bord von Kreuzfahrtschiffen nicht genutzt. Ein besonderer Vorteil dieser Behandlung liegt in der Biogaserzeugung, wodurch ein zusätzlicher Energieträger direkt an Bord verfügbar gemacht wird.

Vor diesem Hintergrund hat sich das CLEAN-Projektkonsortium zusammengeschlossen, um gemeinsam vielversprechende Ansätze der Anaerobtechnik an Bord von Kreuzfahrtschiffen zu erproben, weiterzuentwickeln und langfristig zu etablieren. Die Übertragung vielversprechender Anaerobtechnologien auf den Schiffsbetrieb gestaltet sich nicht ohne Weiteres. Besondere Herausforderungen ergeben sich durch den begrenzten Platz an Bord, abweichende und schwankende Substratzusammensetzungen sowie durch besondere rechtliche und sicherheitstechnische Vorgaben in der maritimen Anwendung. Dies erforderte eine gezielte Anpassung der eingesetzten Technologien und Verfahren an die spezifischen Anforderungen von Kreuzfahrtschiffen. Als ganzheitliches Entsorgungskonzept für Abwasser und biogene Reststoffe verfolgte das Verbundvorhaben CLEAN die Integration einer Anaerobstufe in Kombination mit der Abwasseraufbereitung an Bord. Hierzu wurde ein neues Entsorgungskonzept entwickelt, das auf neuartigen, teils neuentwickelten Komponenten basierte und unter realen Betriebsbedingungen an Bord getestet und evaluiert werden sollte. Zentrales Element des Projektes war die Entwicklung, der Bau und die Erprobung eines Anaerobreaktors, der unter Berücksichtigung aller gesetzlichen Vorgaben in das Schiffssystem integriert werden kann. Abbildung 1 stellt die Bausteine des CLEAN-Vorhabens vereinfacht dar.

Im Rahmen des Projekts wurden organische Abfälle, die auf Kreuzfahrtschiffen anfallen, wie Speisereste und Klärschlamm, umweltgerecht verwertet. Ziel war es, die Abfallmengen zu reduzieren, diese biologisch zu stabilisieren und zu hygienisieren sowie das bei der anaeroben Behandlung entstehende Biogas effizient zu nutzen. Ein weiteres Ziel war es, die Abgabe von Klärschlämmen und Speiseresten gemäß MARPOL-Regularien auf See zu vermeiden, um die

Bemühungen der bordeigenen Abwasserreinigung nicht zu konterkarieren. Damit sollte das Projekt nicht nur einen Beitrag zur Verbesserung des technischen Umweltschutzes an Bord leisten, sondern auch Reedereien einen Anreiz bieten, geeignete Anaerobtechnik bereits vor regulatorischen Verpflichtungen freiwillig zu implementieren. Die schiffseitige Nutzung des erzeugten Biogases ist dabei besonders relevant, da sie an die bestehende Zulassung zur Nutzung von Erdgas, insbesondere LNG (Liquefied Natural Gas), als Schiffskraftstoff (IMO, 2015) anknüpfen könnte.

Insgesamt hat das CLEAN-Projekt dazu beigetragen, die Energieeffizienz und den Umweltschutz auf Kreuzfahrtschiffen erheblich zu verbessern und gleichzeitig neue technologische Lösungen für die maritime Industrie entwickelt.

Für die Implementierung eines solchen anaeroben Verfahrens auf Schiffen waren gezielte Anpassungen und Optimierungen erforderlich. Vor diesem Hintergrund umfasste die Aufgabenstellung im CLEAN-Projekt folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Die Festlegung von Verfahrensvorrausetzungen für den Einsatz der Anaerobtechnik an Bord
2. Die Verfahrensentwicklung und -auslegung
3. Konstruktion-, Erprobung und verfahrenstechnische Integration eines Anaerobreaktors an Bord
4. Ableitung von praxisrelevanten Bewertungen und Empfehlungen

Die im CLEAN-Verbund definierten Aufgaben wurden arbeitsteilig in mehreren Teilprojekten bearbeitet.

Carnival Maritime hat in das Konsortium umfassende Erfahrung im Schiffsmanagement und –betrieb eingebracht und unterstützte die Erprobung der Technologie durch die Bereitstellung des Kreuzfahrtschiffs im laufenden Betrieb. Das Arbeitspaket umfasst die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartner zur Auslegung, Genehmigung sowie Installation und Inbetriebnahme der Anlage an Bord.

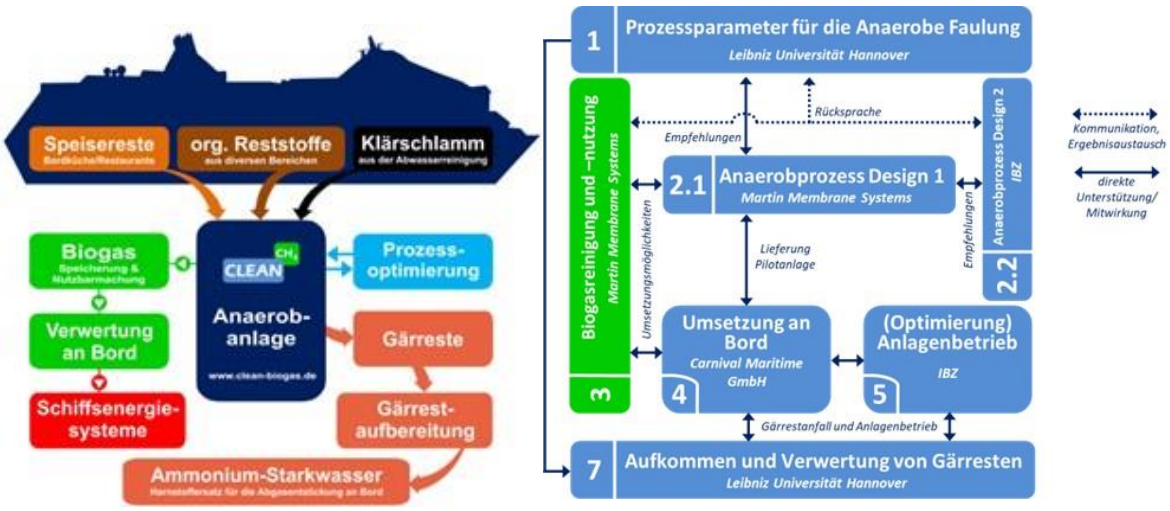


*Abbildung 1: Struktur und Inhalte des CLEAN Vorhabens*

Carnival Maritime verfolgte im Rahmen des CLEAN-Projekts drei zentrale Zielsetzungen, die auf eine innovative technologische Lösung zur energetischen Nutzung organischer Reststoffe an Bord abzielten:

1. **Energiegewinnung aus organischen Reststoffen.** Die Umwandlung anfallender organischer Abfälle wie Speisereste und Klärschlamm in Biogas sollte die Grundlage für eine an Bord realisierte Kreislaufwirtschaft bilden. Ziel war es, nachhaltige Energiequellen zu erschließen und somit zur Reduktion fossiler Brennstoffe im Schiffsbetrieb beizutragen und parallel dazu das anfallende Abfallströme und daraus resultierende Umweltbelastungen zu reduzieren.
2. **Systementwicklung durch interdisziplinäre Zusammenarbeit.** Durch die enge Kooperation von Wissenschaft, Industrie und Schifffahrtsunternehmen im Projektkonsortium wird die Entwicklung, Anpassung und Implementierung geeigneter Systeme für den Bordbetrieb gezielt vorangetrieben. Dies soll dazu ermöglichen die Beschleunigung der Marktreife vielversprechender innovativer Technologien.
3. **Stärkung der Vorreiterrolle im maritimen Umweltschutz.** Das CLEAN-Projekt unterstrich das Engagement von AIDA Cruises vertreten durch die Carnival Maritime für nachhaltige Lösungen und unterstützte die Positionierung als Vorreiter im Umweltschutz an Bord von Kreuzfahrtschiffen.

Im Rahmen des Projekts wurde angestrebt, den Reifegrad der angewandten Technologie von TRL 3 auf TRL 6 im Sinne der NASA-Definition (NASA, 2023) des Technology Readiness Level (TRL) zu erhöhen.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Kreuzfahrtindustrie hat in den letzten Jahren vermehrt Aufmerksamkeit aufgrund ihres Beitrags zu Umweltfragen erhalten. In ihrem Bestreben, nachhaltigere Reisemöglichkeiten anzubieten, haben Initiativen zur Reduzierung von Lebensmittelabfällen bei der Zubereitung bereits beachtliche Erfolge erzielt. Dennoch bestand noch eine offene Entsorgungsfrage bezüglich der organischen Abfälle, die täglich an Bord von Kreuzfahrtschiffen produziert werden. Dabei spielen nicht nur ökologische Aspekte wie die Dekarbonisierung eine zentrale Rolle, sondern auch strenge Hygieneanforderungen, die eine sichere und gesetzeskonforme Handhabung der Abfälle gewährleisten müssen. Zusätzlich sind die entstehenden Kosten bei der Abgabe und Weiterverarbeitung dieser organischen Rückstände ein entscheidender Faktor, der sowohl wirtschaftliche als auch logistische Herausforderungen für die Reedereien mit sich bringt.

Das vom BMWK geförderte F&E-Projekt CLEAN (Cruise Liners: Efficient Onboard Anaerobic Digestion of Organic Wastes for Energy Recovery) befasste sich konkret mit der Energiegewinnung durch die anaerobe Behandlung organischer Reststoffe direkt an Bord auseinander. Das Projektkonsortium setzte sich aus folgenden Partnern aus der Wissenschaft und Industrie zusammen:

- Martin Systems GmbH
- Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V.
- Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik - Leibniz University Hannover
- Carnival Maritime GmbH

Eigene Vorarbeiten

Carnival und AIDA Cruises haben bereits seit 2003 umfangreiche Vorarbeiten im Bereich der Abwasserbehandlung und -optimierung geleistet. Im Rahmen eines freiwilligen Beprobungsprogramms wurden kontinuierlich Zu- und Abflüsse der Abwasseranlagen analysiert, um deren Qualität zu bewerten. Die gewonnenen Daten dienten als Grundlage für die Erstellung von Betriebsanweisungen und die technische Optimierung der Anlagen. So konnte beispielsweise die Nachchlorinierung auf Schiffen der Sphinx-Klasse eingestellt werden, da die Membranfilter coliforme Bakterien zuverlässig zurückhalten.

Weitere Versuchsreihen beschäftigten sich mit der Phosphatfällung an Bord der AIDAsol, wobei die Wirksamkeit verschiedener Eisen- und Aluminiumsalze getestet wurde. Im Jahr 2013 startete AIDA Cruises das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Verbundprojekt NAUTEK, das innovative Verfahren zur Stickstoffelimination und Grauwasserwiederverwendung entwickelte. Besonders hervorzuheben ist die Kombination aus intermittierender Denitrifikation und getauchter Membrantechnologie, die eine kompaktere Bauweise neuer und nachgerüsteter Anlagen ermöglicht.

Ein weiterer Meilenstein war die Entwicklung eines Konzepts zur anaeroben Behandlung organischer Reststoffe mit dem Ziel der Biogasgewinnung. Dieses Konzept wird im CLEAN-Projekt weiterverfolgt. Die Umsetzung einer Biogasproduktion an Bord stellt hohe Anforderungen an Technik und Sicherheit. AIDA Cruises war die erste Kreuzfahrtreederei, die die Vorgaben des IGF Codes sowie der Interim Guideline MSC.285(86) und des IGC Codes Kapitel 16 auf einem Kreuzfahrtschiff realisierte.

Die Inbetriebnahme der AIDAprima im April 2016 markierte einen Wendepunkt: Erstmals wurde ein Kreuzfahrtschiff mit LNG-basiertem Energiesystem ausgestattet. Die technische Herausforderung lag insbesondere in der Konzeption der LNG-Übernahmestation, inklusive Sicherheitsvorkehrungen und Kommunikationssystemen. Die Versorgungsplanung wurde von den jeweiligen Hafenstaaten geprüft und genehmigt. Parallel dazu wurde die gesamte Besatzung von rund 950 Personen regelmäßig in sicherheitsrelevanten Themen geschult – abgestuft nach Dienstgrad und Verantwortungsbereich.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in 7 Arbeitspaket gegliedert und bearbeitet. Die werden folgenden ausgelistet und eine graphische Einblick der Schnittstelle zwischen den Arbeitspakete wurde in der Abbildung 1 dargestellt.

- AP 1: Prozessparamenter für die Anaerobe Faulung
- AP 2: Design Anaerob-Prozess
    - AP 2.1: Anaerob-Prozess Design 1
    - AP 2.2: Anaerob-Prozess Design 2
- AP 3: Biogas-Reinigung und Nutzung
- AP 4: Umsetzung an Bord
- AP 5: (Optimierung) Anlagenbetrieb
- AP 6: Entfallen
- AP 7: Aufkommen und Verwertung von Gärresten

Das Arbeitspaket 4 – Umsetzung an Bord – wurde von Carnival Maritime durchgeführt und befasste sich mit der Installation der Anlage an Bord. Im Rahmen dieses Arbeitspakets beschäftigte sich Carnival Maritime gemeinsam mit dem Anlagenhersteller und Projektpartner Martin Systems mit der Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanung.

Da die finale Genehmigung der Anlagenkonstruktion während der Projektlaufzeit nicht erteilt wurde, konnten die folgenden Arbeitspunkte zur Installation und zur Betriebsüberwachung nicht umgesetzt werden. Die zugehörigen Arbeitspunkte sind im Folgenden gelistet:

- Kreuzfahrtanbieter organisiert Zugang zu Kreuzfahrtschiffen
- Durchführung von Entwurfs-, Genehmigungs-(Klassifikationsgesellschaft) und Ausführungsplanung zum Einbau der Pilotanlage
- Ermöglicht den Testbetrieb einer Pilotanlage durch Auf- und Abbau mit Technikern an Bord
- Betreuung der Pilotanlage und Unterstützung der Datenaufnahme
- Fachgerechte Behandlung und/oder Entsorgung der organischen Reststoffe an Land oder durch ein thermisches Verfahren an Bord

Zu Beginn des Projektes wurden Zugänge für umfangreiche Probennahmen auf verschiedenen Schiffen der AIDA-Flotte gestellt. Diese dienten der Analyse der organischen Abfallströme an Bord und bildeten die Grundlage für das Design der Versuchsanlage. Die AIDA-Hyperion-Klasse wurde als geeignete Plattform für den Demonstrator ausgewählt. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung erster Entnahmevorrichtungen sowie die Definition relevanter Messstellen an Bord.

Ab 2019 lag der Fokus auf der Entwicklung eines Sicherheits- und Integrationskonzepts. Die Zusammenarbeit mit der Klassifikationsgesellschaft war dabei zentral, um die Anforderungen für einen sicheren Betrieb der Anlage an Bord zu erfüllen. Verzögerungen traten auf, unter anderem durch hohe Arbeitsbelastung bei den Projektpartnern und später durch die COVID-19-Pandemie, die Bordzugänge und Projektarbeit erheblich einschränkte. Eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts wurde genehmigt, um die Arbeiten fortzusetzen.

In den Jahren 2021 und 2022 wurde die Sicherheitsanalyse durch externe Berater vertieft. In Workshops mit der Klassifikationsgesellschaft DNV wurden sicherheitsrelevante Aspekte wie Druckbegrenzung, Gasführung und Entsorgung der Gärreste analysiert. Die Ergebnisse führten zu einer Überarbeitung des

Anlagenkonzepts. Die Klassifikationsgesellschaft erteilte daraufhin ein „Approval in Principle“, dass die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit der Anlage bestätigte.

Parallel dazu wurden die Genehmigungsverfahren mit den italienischen Behörden als Flaggenstaat des Schiffes vorangetrieben. Diese gestalteten sich jedoch als langwierig, insbesondere aufgrund zusätzlicher Anforderungen an die Umweltverträglichkeit der Anlage. Themen wie die Vermischung sortenreiner Abfallströme und die Ventilation von Gärgasen standen im Mittelpunkt der Diskussionen.

Trotz dieser Herausforderungen wurde das Integrationskonzept weiterentwickelt. Die Anlage wurde in bestehende Schiffssysteme eingebunden, insbesondere in das Alarm- und Überwachungssystem. Die finale Dokumentation zur Klassegenehmigung wurde erstellt und eingereicht. Im Jahr 2023 wurde das Genehmigungsverfahren weitergeführt, wobei einige Iterationszyklen zusammen mit den Projektpartner und die Klassifikationsgesellschaft durch Prüfung, Bearbeitung und Einreichung der Pläne erfolgte.

Die Installation der Anlage an Bord war für die zweite Jahreshälfte 2024 geplant. Allerdings konnte die erforderliche Genehmigung seitens der Klassifikationsgesellschaften innerhalb der Projektlaufzeit nicht erteilt werden. Aus diesem Grund wurde die Anlage zunächst an Land installiert und wird außerhalb der Projektlaufzeit weiter erprobt.

## 1.4 Wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde

Das CLEAN-Projekt knüpfte an eine Reihe wissenschaftlicher und technischer Entwicklungen an, die in den letzten Jahren im maritimen Bereich vorangetrieben wurden. Besonders relevant waren die Erkenntnisse aus dem NAUTEK-Verbundvorhaben, das innovative Verfahren zur Abwasserreinigung und -wiederverwendung auf Kreuzfahrtschiffen entwickelte. Dabei standen insbesondere die Nährstoffelimination im Schwarzwasser sowie die Behandlung organisch stark belasteter Küchenabwässer im Fokus.

Ein weiterer Bezugspunkt war die zunehmende Bedeutung der Umweltanforderungen im Ostseeraum, wo durch die Einstufung als MARPOL-Sondergebiet strengere Vorgaben für die Abwasserbehandlung galten. Diese regulatorischen Entwicklungen führten zu einem erhöhten Bedarf an technischen

Lösungen zur Reduktion und Verwertung organischer Reststoffe wie Klärschlamm und Speiseresten.

Parallel dazu hatte sich die Kreuzfahrtbranche intensiv mit der energetischen Versorgung ihrer Schiffe beschäftigt. AIDA Cruises setzte frühzeitig auf den Einsatz von Flüssigerdgas (LNG) als alternativen und emissionsärmeren Treibstoff. Mit dem Einbau eines LNG-fähigen Motors auf der AIDAprima wurde ein bedeutender technologischer Schritt vollzogen. Die Nutzung von LNG erforderte jedoch auch die Einhaltung internationaler Sicherheitsstandards. Hierzu wurde der IGF-Code (International Code of Safety for Ships using Gases or other Low Flashpoint Fuels) der International Maritime Organization (IMO) herangezogen (IMO, 2015), der die sicherheitstechnischen Anforderungen für den Betrieb von Schiffen mit gasförmigen Brennstoffen regelt. Die Erfahrungen aus der Planung und dem Betrieb der LNG-Versorgungseinrichtungen – einschließlich Übernahmestation, Sicherheitsabschaltungen, Inertisierung und Kommunikation – flossen ebenfalls in die CLEAN-Arbeiten ein.

Das Projekt baute dabei auch auf die Vorarbeiten des BMWi-geförderten Netzwerks „Biogas Maritim“ auf, das als assoziierter Partner im CLEAN-Verbund vertreten war und wertvolle Impulse für die technische Umsetzung lieferte.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Durchführung des CLEAN-Projekts basierte auf einer klar strukturierten und zielgerichteten Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Partnern. Für jedes Arbeitspaket wurde ein federführender Projektpartner benannt, der auf Grundlage seiner fachlichen Expertise und vorhandenen Infrastruktur die Leitung übernahm. Diese eindeutige Zuordnung ermöglichte eine klare Rechenschaftspflicht und förderte eine effiziente Projektabwicklung.

Der Informationsaustausch wurde durch regelmäßige Projekttreffen und Ergebnisworkshops sichergestellt. Die kompakte und gezielt zusammengestellte Projektstruktur erwies sich als besonders effektiv, da Verantwortlichkeiten klar verteilt und Abstimmungen zügig vorgenommen werden konnten.

Carnival Maritime war in mehreren zentralen Arbeitspaketen aktiv beteiligt:

AP 2.1 / 3 – Anaerobprozess-Design und Biogasreinigung/-nutzung: Diese Arbeitspakete wurden von Martin Membrane Systems (MMS) geleitet. Zwischen MMS und Carnival Maritime fand ein intensiver und kontinuierlicher Informationsaustausch statt, der sicherstellte, dass alle relevanten Anforderungen für die Auslegung und den Bau der Anlage berücksichtigt wurden.

AP 4 – Umsetzung an Bord: In diesem Arbeitspaket übernahm Carnival Maritime die Hauptverantwortung und arbeitete intensiv mit der Anlagehersteller Martin Membrane Systems.

Zur Unterstützung sicherheitsrelevanter Fragestellungen wurde GMW Consultancy von Carnival Maritime als Subunternehmer beauftragt. GMW brachte umfassende Expertise im Bereich der Sicherheit gasförmiger Systeme an Bord von Schiffen ein und unterstützte insbesondere bei der Bewertung und Umsetzung technischer Schutzmaßnahmen.

Darüber hinaus wurde das Projekt durch wissenschaftliche Begleitung unterstützt, was eine umfassende Publikation der Ergebnisse ermöglichte. Dies entsprach dem Ziel von Carnival Maritime, die Entwicklung geeigneter Bordsysteme zu fördern und zu beschleunigen.

Ein weiterer wichtiger Partner außerhalb des Projektverbundes war die Klassifikationsgesellschaft DNV. Als zertifizierende und genehmigende Organisation im Auftrag des Flaggenstaates Italien trug DNV wesentlich zur Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen und zur Umsetzung technischer Schutzmaßnahmen bei. Ihre Expertise stellte sicher, dass alle Komponenten fachgerecht und regelkonform in die Schiffssysteme integriert werden können.

# 2 Eingehende Darstellung

## 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

### 2.1.1 Konzept zur Energiegewinnung aus Reststoff

Im Rahmen des Forschungsprojekts CLEAN wurde ein innovatives System zur anaeroben Behandlung organischer Reststoffe auf Kreuzfahrtschiffen entwickelt. Ziel war es, durch die Erzeugung von Biogas aus Speiseresten, Klärschlamm und Fetten einen wirksamen Beitrag zur nachhaltigen Energiegewinnung und Abfallverwertung auf See zu leisten. Das Konzept bietet nicht nur eine Möglichkeit zur Energieerzeugung an Bord, sondern auch eine optimierte Strategie zur Abfallbehandlung. Durch die Integration des Systems wird der Wärmeenergiebedarf zur Trocknung organischer Abfälle deutlich reduziert, was zu einer effizienteren Nutzung der vorhandenen Ressourcen führt. Darüber hinaus trägt die optimierte Behandlung der organischen Reststoffe zu einer Verbesserung der $CO_2$-Bilanz bei und leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Umweltauswirkungen des Abfallmanagements auf Kreuzfahrtschiffen. Das Konzeptschema wird in der Abbildung 2 dargestellt.

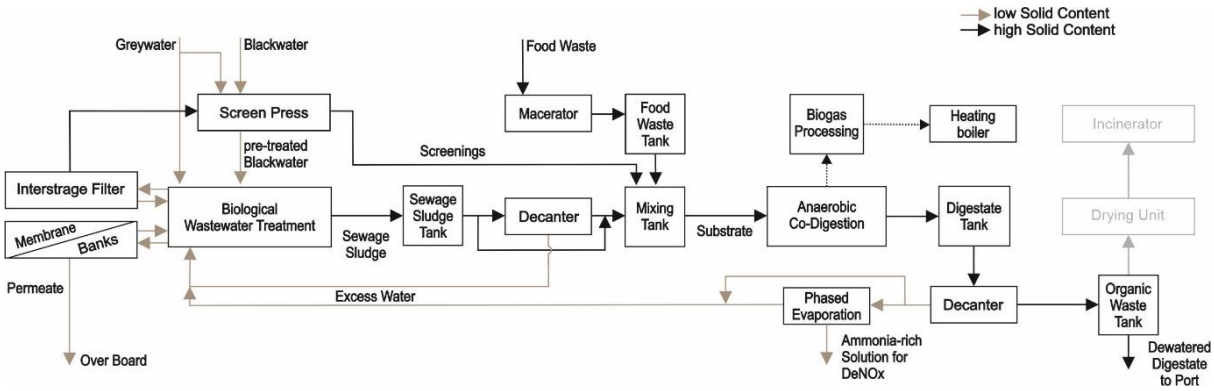


*Abbildung 2: CLEAN Abfallmanagement Schema (Fahrnholz, et al., 2023)*

### 2.1.2 Potentialanalyse und Zusammensetzung des Schiffsabfalls

Im Zuge des Forschungsprojekts CLEAN wurden umfängliche Informationen zu den vorherrschenden Rahmenbedingungen an Bord von Kreuzfahrtschiffen erhoben. Dazu zählen relevante Substrate, geeignete Verfahrensarten, potenzieller Gasertrag sowie Eigenschaften der entstehenden Gärreste. Diese Daten bildeten

die Grundlage für die anschließenden Arbeiten der Projektpartner. Da vor Projektbeginn nur wenige oder gar keine verlässlichen Informationen zu Menge und Zusammensetzung der organischen Stoffströme, insbesondere Speisereste, Klärschlamm und Rückstände aus Screen-Press-Systemen, vorlagen, wurde ein detailliertes Substrat-Screening zusammen mit den Projektpartnern durchgeführt. Dabei konnten zentrale Kennwerte ermittelt werden, die für die Auslegung und Bewertung der Versuchsanlage entscheidend waren. Die Ergebnisse der Potentialanalyse sind umfassend in (Schumüller, Weichgrebe , & Köster , 2022) beschrieben. Auf dieser Basis konnte das Ertragspotential der Pilotanlage, die täglich etwa 50 Liter Abfälle aus Klärschlamm, organischen Abfällen und Fett verarbeitet, erfolgreich berechnet werden; dieser ist in Tabelle 1 dargestellt.

| Biogas Komponente | Formula | Volumen Fraktion [% v/v] | Ertrag der Pilotanlage [$Nm^3/d$] |
|---|---|---|---|
| Methan | $CH_4$ | 40 - 80 | 3,2 |
| Kohlendioxid | $CO_2$ | 20 - 60 | 2,1 |
| Stickstoff | $N_2$ | 0 - 5 | Max. 0,2 |
| Wasser | $H_2O$ | Ca. 3 | |
| Wasserstoff | $H_2$ | < 1 | Max. 0,04 |
| Schwefelwasserstoff | $H_2S$ | < 1 | Max. 0,04 |
| Ammoniak | $NH_3$ | < 0, 3 | Max. 0,013 |
| Flüchtige Fettsäuren | $C_xH_yO_z$ | Spuren | |

*Tabelle 1: Erwartete Biogaszusammensetzung (Fahrnholz, et al., 2023)*

### 2.1.3 Anlage für die maritime Anwendung

Für den Einsatz an Bord wurde eine spezielle Biogas-Versuchsanlage entwickelt und konstruiert. Der sogenannte High-Performance Fermenter ist in Abbildung 3 dargestellt. Er besteht aus einem Mischtank, zwei in Serie geschalteten Tanks, die einen gestuften Reaktor konstituieren, der im mesophilen Temperaturbereich betrieben wird. Die Anlage wird als „Continuously Stirred Tank Reactor“ betrieben, bei dem das Schlammalter und die hydraulische Aufenthaltszeit identisch sind. Die Anlagekapazität beträgt 50 Liter pro Tag.

Da eine Installation an Bord innerhalb der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden konnte, wird die Versuchsanlage derzeit an Land getestet.

*Abbildung 3: CLEAN Biogasanlage in Testbetrieb an Land*

### 2.1.4 Sicherheitstechnische Bewertung

Die sicherheitstechnische Bewertung ergab, dass das CLEAN-Pilot-System keine zusätzlichen Risiken für den Schiffsbetrieb mit sich bringt. Im Zuge einer umfassenden HAZID-Analyse wurden insgesamt 38 Maßnahmen zur Risikominderung identifiziert, dokumentiert und nachverfolgt. Dabei wurde kein Szenario mit unzumutbarem Risiko festgestellt. Alle als tolerierbar eingestuften Risiken konnten durch technische oder organisatorische Maßnahmen wirksam mitigiert werden.

Zusätzlich wurde bestätigt:

- Es findet keine Gasproduktion außerhalb der Reaktoren statt.

- Die Anlage ist inhärent sicher gegenüber externem Feuer, da die Flüssigkeit im Reaktor die Temperatur auf etwa 100 °C begrenzt.
- Die technische Auslegung erlaubt eine sichere Stillsetzung im Notfall, z. B. durch kontrollierte Entleerung oder thermische Deaktivierung des biologischen Prozesses.

Insgesamt zeigt sich, dass das CLEAN-System sicher, robust und regelkonform konzipiert wurde. Die Versuchsanlage wurde vollständig errichtet, befand sich jedoch zum Zeitpunkt der Abschlussbewertung noch nicht an Bord. Die regulatorischen Rahmenbedingungen sowie sicherheitstechnischen Anforderungen wurden umfassend zusammengestellt und bei der Konstruktion berücksichtigt.

### 2.1.5 Regulatorische Bewertung

Die regulatorische umweltbezogene Analyse zeigt, dass das internationale Regelwerk der IMO, insbesondere das MARPOL-Übereinkommen, derzeit die Entsorgung von Speiseabfällen und Abwasser auf See unter bestimmten Bedingungen erlaubt, ohne dabei die ökologischen Auswirkungen auf das marine Ökosystem umfassend zu berücksichtigen. Gleichzeitig eröffnet MARPOL mit Annex VI, Regulation 4, die Möglichkeit zur Anwendung alternativer Technologien wie dem CLEAN-Konzept, sofern diese von der zuständigen Flaggenstaat-Administration genehmigt werden.

Aus Sicht der landseitigen Abfallbehandlungsstandards in der EU wird die Vermischung zuvor getrennter Abfallfraktionen – wie sie im CLEAN-Reaktor erfolgt – nicht bevorzugt. Zwar ist diese Anforderung nicht direkt auf Schiffe übertragbar, sie dient jedoch europäischen Betreibern als wichtige Orientierung für ein umweltgerechtes Abfallmanagement an Bord.

Für die sicherheitstechnische Bewertung des CLEAN-Systems kann der IGF-Code (International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels) als Referenz herangezogen werden. Dieser bietet zwar eine strukturierte Grundlage für den Umgang mit brennbaren Gasen an Bord, erweist sich jedoch in vielen Aspekten als deutlich umfangreicher, als es für eine Biogasanlage tatsächlich erforderlich wäre. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der IGF-Code primär auf großvolumige Kraftstoffsysteme ausgelegt ist, bei denen durch umfassende Regelungen ein akzeptables Risikoniveau gewährleistet werden soll. Im Vergleich dazu zeigen die spezifischen Schadensszenarien einer Biogasanlage, dass viele der im IGF-Code geforderten Mitigationsmaßnahmen nicht zielgerichtet oder

verhältnismäßig sind. Eine differenzierte Betrachtung der sicherheitsrelevanten Anforderungen ist daher notwendig.

Ein zentrales regulatorisches Thema betrifft die Nutzung des an Bord erzeugten Biogases als Kraftstoff. Da das Schiff in diesem Fall sowohl als Produzent als auch als Verbraucher des Kraftstoffs auftritt, ist eine Zertifizierung der damit verbundenen Emissionsminderungen entlang der gesamten Brennstoff-Wertschöpfungskette erforderlich. Nur so kann die Nutzung des Biogases im Rahmen aktueller und zukünftiger Dekarbonisierungsvorgaben (z. B. CII, FuelEU, EU ETS, IMO NZF) angerechnet werden. Dies stellt neue Anforderungen an die Nachweisführung, insbesondere im Hinblick auf die Anerkennung durch Flaggenstaaten und Klassifikationsgesellschaften.

### 2.1.6 Reflektion der Zielerreichung

Carnival Maritime verfolgte mit dem CLEAN-Projekt drei zentrale Zielsetzungen, die auf eine nachhaltige Transformation des Abfall- und Energiemanagements an Bord von Kreuzfahrtschiffen abzielten. Im Projektverlauf konnten trotz einzelner operativer Einschränkungen wesentliche Fortschritte erzielt werden, die eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung und spätere Implementierung des Konzepts bilden. Im Folgenden wird die Zielerreichung im Einzelnen reflektiert.

**1. Nutzbarmachung weiterer Energiepotenziale an Bord und Einsparung von Primärenergie**

Ein zentrales Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Systems zur energetischen Verwertung organischer Reststoffe an Bord. Aufgrund genehmigungsbezogener Herausforderungen konnte der Demonstrator nicht wie geplant auf einem Schiff installiert werden. Die energetische Verwertbarkeit basiert daher bislang auf Ergebnissen aus dem landseitigen Versuchsbetrieb mit synthetischen Abfallströmen. Diese Versuche lieferten jedoch belastbare Daten zur grundsätzlichen Machbarkeit und Effizienz des Systems.

Parallel dazu wurden an Bord Maßnahmen zur Prozessoptimierung umgesetzt, die zu einer signifikanten Reduktion der organischen Abfallmengen pro Passagier führten. Dies stellt einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung dar, reduziert jedoch gleichzeitig das energetische Potenzial für das CLEAN-System. Insgesamt konnte das Ziel der Energieeinsparung in Teilen erreicht werden, wobei die Ergebnisse eine wertvolle Grundlage für die weitere Validierung im Realbetrieb darstellen.

**2. Beschleunigung der Entwicklung geeigneter Systeme für den Bordbetrieb**

Trotz der nicht erfolgten Installation an Bord wurde die technologische Entwicklung des CLEAN-Systems im Projektverlauf deutlich vorangetrieben. Die landseitige Erprobung ermöglichte eine praxisnahe Validierung der Systemkomponenten. Darüber hinaus wurde in enger Abstimmung mit Klassifikationsgesellschaften und Behörden des Flaggenstaates ein strukturierter Genehmigungsprozess durchlaufen, der mit der Erteilung eines „Approval in Principle" sowie der Erstellung eines Lastenhefts für den Factory Acceptance Test erfolgreich abgeschlossen wurde.

Das angestrebte Technology Readiness Level (TRL) 6 konnte zwar nicht vollständig erreicht werden, jedoch stellt der erreichte TRL 5 einen substanziellen Fortschritt dar. Die im Projekt geschaffenen technischen und regulatorischen Voraussetzungen ermöglichen eine beschleunigte Umsetzung in der nächsten Projektphase und erhöhen die Investitionssicherheit für potenzielle Folgeprojekte. Auf Basis der erzielten Ergebnisse wurde zudem die Entwicklungsarbeit an einem holistischen Gesamtsystem für einen Schiffsneubau initiiert, um das CLEAN-System in einem integrierten maritimen Kontext weiterzuführen.

**3. Unterstützung bei der Strategie der angestrebten Vorreiterrolle im Umweltschutz auf Kreuzfahrtschiffen**

Das CLEAN-Projekt hat durch seinen innovativen Ansatz und die enge Zusammenarbeit im Konsortium einen wichtigen Beitrag zur ökologischen Positionierung der Kreuzfahrtbranche geleistet. Die entwickelte Technologie übertrifft – soweit bekannt – den aktuellen Stand der Technik an Bord in Bezug auf Nachhaltigkeit und Innovationsgrad deutlich. Carnival Maritime konnte durch die aktive Mitwirkung im Projekt seine strategische Ausrichtung im Bereich Umwelt- und Ressourcenschutz weiter stärken und seine Vorreiterrolle im Bereich nachhaltiger Kreuzfahrtbetrieb ausbauen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Projekt CLEAN wesentliche Beiträge zur Erreichung der gesetzten Ziele geleistet hat. Die entwickelten Technologien, die gewonnenen Erkenntnisse und die geschaffenen regulatorischen Grundlagen bilden eine tragfähige Basis für die weitere Umsetzung und Skalierung des Konzepts.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Rahmen des Projekts durch Carnival Maritime getätigten Ausgaben waren vollständig und ausschließlich zur Erreichung der Projektziele erforderlich. Im Verlauf des Vorhabens wurde jedoch auf Antrag von Carnival Maritime die ursprünglich bewilligte Fördersumme angepasst, da die geplante Installation der Anlage an Bord nicht erfolgte.

Diese Änderung führte zu einer Reduzierung der Gesamtausgaben sowie zur vollständigen Streichung einzelner Kostenpositionen, wie etwa der Materialkosten, und zur Anpassung der Personalkosten. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zum finalen Projektstand sind in Tabelle 2 dargestellt.

| Position | Bezeichnung | Bewilligt | Zuwendung |
|---|---|---|---|
| 0813 | Material | - | |
| 0837 | Personalkosten | 89.814,15 | |
| 0838 | Reisen | 1.869,77 | |
| 0850 | Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten | 61.000,00 | |
| | Summe | 179.138,42 EUR | 71.655,37 EUR |

*Tabelle 2: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises*

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Carnival Maritime leistete im Rahmen des CLEAN-Projekts einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Projektziele. Die durch Carnival Maritime verantworteten Aufgaben wurden zielgerichtet und fachlich fundiert durchgeführt. Die Arbeiten orientierten sich konsequent an den Anforderungen des Gesamtvorhabens und trugen maßgeblich zur inhaltlichen Tiefe und Qualität der Ergebnisse bei.

Aufgrund der Auswirkungen der COVID-19-Pandemie sowie der naturgemäß mit Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verbundenen Unsicherheiten kam es im Verlauf des Projekts zu zeitlichen Verzögerungen. Diese wurden durch kostenneutrale Verlängerungen aufgefangen, die im Rahmen konsortialer Abstimmungen beschlossen wurden.

Insgesamt trug Carnival Maritime mit technischer Kompetenz entscheidend zum Erfolg des CLEAN-Projekts bei.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Rahmen des CLEAN-Projekts wurde ein innovatives Konzept zur energetischen Verwertung organischer Reststoffe an Bord von Kreuzfahrtschiffen entwickelt, erprobt und umfassend bewertet. Ziel war es, durch die Integration anaerober Verfahren zur Biogaserzeugung einen wirksamen Beitrag zur Reduktion von Lebensmittelabfällen, zur Verbesserung der Energieeffizienz sowie zur nachhaltigen Weiterentwicklung des Abfallmanagements auf See zu leisten.

Die im Projektverlauf erzielten Ergebnisse zeigen, dass die anaerobe Behandlung von Speiseresten und Klärschlamm technisch umsetzbar, sicher betreibbar und regulatorisch grundsätzlich genehmigungsfähig ist. Die entwickelte Versuchsanlage wurde erfolgreich an Land getestet und lieferte belastbare Daten zur Biogasausbeute, Prozessstabilität und sicherheitstechnischen Bewertung. Die Sicherheitsanalyse, einschließlich HAZID und Ex-Zonen-Bewertung, bestätigte, dass das CLEAN-System keine zusätzlichen Risiken für den Schiffsbetrieb darstellt. Die Klassifikationsgesellschaft erteilte ein „Approval in Principle“, was die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit der Anlage unterstreicht.

Trotz dieser Erfolge konnte die geplante Installation der Anlage an Bord innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisiert werden. Die Gründe hierfür lagen insbesondere in langwierigen Genehmigungsverfahren, zusätzlichen Anforderungen an die Umweltverträglichkeit sowie pandemiebedingten Einschränkungen. Die Anlage wird jedoch außerhalb der Projektlaufzeit weiter getestet, um die Praxistauglichkeit unter realen Bedingungen zu validieren.

Die begleitende wissenschaftliche Studie (Köster, Freyschmidt, & Würsig, 2025) zeigte, dass das energetische Potenzial organischer Abfälle an Bord erheblich ist. Besonders Speisereste und Klärschlamm bieten stabile und langfristig verfügbare Substrate für die Biogaserzeugung. Die Integration des CLEAN-Konzepts könnte – je nach Schiffsklasse – bis zu 0,25 % (LNG-Schiffe) bzw. 1,24 % (MDO/HFO-Schiffe) des Gesamtenergiebedarfs decken. Darüber hinaus wurden weitere Waste-to-Energy-

Optionen wie die thermische Verwertung von Ölschlämmen und die Pyrolyse anderer organischer Fraktionen untersucht. Diese ergänzen das CLEAN-Konzept sinnvoll, insbesondere auf Schiffen mit konventionellem Antrieb.

Ausblickend lässt sich festhalten, dass das CLEAN-Projekt eine tragfähige Grundlage für die Weiterentwicklung und Skalierung des Konzepts geschaffen hat. Die erreichte Technologiereife (TRL 5) ermöglicht eine beschleunigte Umsetzung in Folgeprojekten. Für eine erfolgreiche Implementierung im maritimen Betrieb sind jedoch weitere Schritte erforderlich:

- Validierung im Realbetrieb: Die geplante Installation an Bord sollte zeitnah nachgeholt werden, um die Systemintegration unter realen Bedingungen zu erproben.
- Weiterentwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen: Die Anerkennung von Biogas als emissionsmindernder Energieträger im Sinne von CII, FuelEU Maritime und EU ETS erfordert eine enge Abstimmung mit Flaggenstaaten und Klassifikationsgesellschaften.
- Optimierung der Systemkomponenten: Insbesondere hinsichtlich Platzbedarfs, Automatisierung und Energieeffizienz bestehen Potenziale zur Weiterentwicklung.
- Integration in ganzheitliche Abfall- und Abwasserstrategien: Die Kombination mit anaeroben Vorbehandlungsstufen im Abwassersystem könnte die Biogasausbeute weiter steigern und zusätzliche Synergien schaffen.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in drei zentrale Verwertungsperspektiven mit unterschiedlichen Zeithorizonten gliedern:

- Wissenschaftliche und strategische Erkenntnisse (1-2 Jahre):

Die Erkenntnisse über das Energiepotenzial der Abfallströme und die Bewertung innovativer Entsorgungskonzepte liefern eine fundierte Basis für strategische Entscheidungen im Bereich der Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft an Bord.

- Kurzfristige Umsetzung (1–2 Jahre):

Die im Projekt entwickelten technischen und sicherheitstechnischen Konzepte können unmittelbar zur Verbesserung der Müllverarbeitung in der fahrenden Flotte beitragen. Dazu zählen insbesondere die Erkenntnisse zur sicheren Handhabung und zur Integration in bestehende Schiffssysteme.

Zudem liegen belastbare Daten zum Energiepotenzial der Abfallströme vor, die als Grundlage für die Bewertung alternativer Entsorgungsstrategien dienen können.

- Mittelfristige Umsetzung (2–5 Jahre):

Die im CLEAN-Projekt entwickelten Konzepte und Systemkomponenten können als Entscheidungsgrundlage für Neubaukonzepte herangezogen werden. Insbesondere bei der Planung neuer Schiffsgenerationen bietet sich die Möglichkeit, anaerobe Behandlungsstufen und Biogassysteme von Beginn an systemisch zu integrieren.

Das CLEAN-Projekt hat gezeigt, dass innovative Technologien zur Kreislaufwirtschaft auch im anspruchsvollen Umfeld der Kreuzschifffahrt erfolgreich entwickelt und perspektivisch implementiert werden können. Es leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung und zur ökologischen Transformation der maritimen Industrie.

## 2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des CLEAN-Projekts wurden Carnival Maritime keine vergleichbaren Fortschritte auf dem spezifischen Themenfeld der anaeroben Behandlung organischer Reststoffe an Bord von Kreuzfahrtschiffen bekannt, die die Planung oder Durchführung der eigenen Projektaktivitäten beeinflusst hätten.

Zwar sind im Projektzeitraum auch andere technologische Ansätze zur Förderung der Kreislaufwirtschaft von Abfällen an Bord von Kreuzfahrtschiffen entwickelt worden, die auf unterschiedlichen Prinzipien basieren. Eine projektbegleitende Studie hat jedoch gezeigt, wie diese Ansätze komplementär zum CLEAN-Konzept stehen und dessen Vorteile bestätigen. Insbesondere die Integration einer anaeroben Behandlungsstufe zur Co-Vergärung von Speiseresten und Klärschlamm direkt an Bord wurde – nach aktuellem Kenntnisstand – bislang weder in vergleichbarer technischer Tiefe noch mit einem ähnlich praxisnahen Fokus untersucht.

Die systemische Herangehensweise, die enge Anbindung an reale Betriebsbedingungen sowie die technische Ausgestaltung des CLEAN-Vorhabens stellen ein Alleinstellungsmerkmal dar und leisten einen eigenständigen Beitrag zur Weiterentwicklung maritimer Umweltverfahrenstechnik.

## 2.6 Veröffentlichung des Ergebnisses

Im Rahmen des CLEAN-Projekts hat Carnival Maritime aktiv zur Verbreitung und Diskussion der Projektergebnisse beigetragen. Die Beteiligung an wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachveranstaltungen unterstreicht das Engagement des Unternehmens für Innovation und Nachhaltigkeit in der maritimen Umwelttechnik.

Publikation:

- Fahrnholz, S.F.; Würsig, G.; Gehring, M.; Schulze, H.; Orth, M.; Pohl, D.; Köster, S. (2023): Clean Cruise Liners: Efficient Onboard Anaerobic Digestion of Organic Wastes for Energy Recovery. In: Tagungsband der Statustagung Maritime Technologien 2023. (Fahrnholz, et al., 2023)

Diese Veröffentlichung dokumentiert die Ergebnisse zur anaeroben Behandlung organischer Reststoffe an Bord und stellt ein zentrales Ergebnis der Projektarbeit dar.

Workshop:

Carnival Maritime richtete am 10. Dezember 2024 den offiziellen Abschlussworkshop des CLEAN-Projekts in Hamburg aus. Die Veranstaltung brachte alle Projektpartner sowie externe Fachstellen wie GMW Consultancy und die Klassifikationsgesellschaft DNV zusammen.

Datum: Dienstag, 10. Dezember 2024

Uhrzeit: 09:00 – 15:00 Uhr

Ort: Carnival Maritime GmbH, Hamburg

Ziel des Workshops war die Vorstellung der finalen Projektergebnisse, die Diskussion einer möglichen Fortführung der Technologie-Demonstration an Land sowie die Erörterung weiterer Schritte zur Umsetzung und Skalierung. Alle Teilnehmenden erhielten einen umfassenden Einblick in die erzielten Fortschritte, insbesondere hinsichtlich der Integration einer anaeroben Behandlungsstufe zur Co-Vergärung organischer Reststoffe an Bord von Kreuzfahrtschiffen.

Der Workshop bot darüber hinaus Raum für interdisziplinären Austausch zwischen Forschung, Industrie und Anwendungspartnern und stellte somit einen gelungenen Abschluss des CLEAN-Vorhabens dar.

Webseite:

Weiterführende Informationen zum Projekt waren unter www.clean-biogas.de abrufbar. Die Website wurde von Martin Membrane Systems betrieben.

# 3 Literaturverzeichnis


Fahrnholz, S., Würsig, G., Gehring, M., Schulze, H., Orth, M., Pohl, D., & Köster, S. (2023). CLEAN: CRUISE LINERS: EFFICIENT ONBOARD ANAEROBIC DIGESTION OF ORGANIC WASTES FOR ENERGY RECOVERY. In *STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN - TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2023* (S. 15-23). doi:ISBN 978-3-95806-732-5

IMO. (2015). *International Code of Safety for Ships using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels. IGF-CODE*. Retrieved from https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/28-CCC1IGF.aspx

Köster, S., Freyschmidt, A., & Würsig, G. (2025). *Scientific consulting for the development of a Waste-to-Energy concept on board cruise ships.*

NASA. (2023, Sept 27). *Technology readiness levels*. Retrieved from https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/

Schumüller, K., Weichgrebe , D., & Köster , S. (2022). Biogas potential of organic waste onboard cruise ships — a yet untapped energy source. *Biomass Conversion and Biorefinery, Volume 12*, pp. 5647–5662.