Verbundprojekt: MarTERA 2019 - DDD-BATMAN

Data-Driven Degradation monitoring and prediction of BATteries for Maritime ApplicatioNs

Vorhaben: Ganzheitliche Optimierung von Batterieanwendungen auf Kreuzfahrtschiffen

Schlussbericht von Carnival Maritime

Vanessa Myriam Grendze, Dipl. – Kffr.

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Förderprogramm:	ERA-NET Cofund MarTERA Call 2019
Förderkennzeichen:	03SX525A
Projektbeginn:	Mai 2020
Projektdauer:	42 Monate
Version:	1
Versionsdatum:	29.06.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

Abbildungsverzeichnis ... 3
Tabellen ... 3
Abkürzungsverzeichnis ... 4
1 Zusammenfassung ... 5
2 Aufgabenstellung und Zielsetzung ... 6
2.1 Aufgabenstellung ... 6
2.2 Zielsetzung von Carnival Maritime ... 7
2.3 Übergeordnete Ziele ... 8
3 Voraussetzungen und Projektverlauf ... 9
3.1 Projektplan von Carnival Maritime ... 10
3.2 Projektumsetzung und Ressourcennutzung ... 12
3.3 Verlauf der einzelnen Arbeitspakete ... 13
3.3.1 AP 1: Datenerfassung und Bereitstellung ... 13
3.3.2 AP 2: Evaluation und Verbesserung der Batterielebensdauer ... 13
3.3.3 AP 3: Datenbasierte Modellierung der nutzbaren Batteriekapazität ... 13
3.3.4 AP 4: Fallstudien: Batterien in der Kreuzfahrtindustrie ... 13
3.3.4.1 Gewährung der Betriebssicherheit des Schiffes während und nach der Installation ... 14
3.3.4.2 Optimierung der Batterielebensdauer und Austauschstrategien ... 16
3.3.4.3 Objektive Analyse des umwelttechnischen Nutzens der Installation ... 20
4 Übersicht der wesentlichen Arbeitsergebnisse ... 25
4.1 Batteriezelltest ... 26
4.2 Erfassung und Übertragung von Betriebsdaten ... 27
4.3 Entwicklung von datengestützten Modellen ... 27
4.4 Hybridisierung von Schiffsantrieben ... 27
4.5 Nutzung datengesteuerter Ansätze und Sensordaten in der Schiffsklassifizierung ... 28
5 Reflektion der Zielerreichung und des Verwertungsplans ... 28
6 Zusammenfassung und Ausblick ... 29
Referenzen ... 31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreuzfahrtschiff AIDAprima 5
Abbildung 2:Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten 9
Abbildung 3: Projektzeitplan gemäß Antragsphase 11
Abbildung 4: Schematische Darstellung des HIL-Prinzips 14
Abbildung 5: HIL-Labor-Hardware-Konfiguration 15
Abbildung 6: BESS Installation auf dem Kreuzfahrtschiff AIDAprima 16
Abbildung 7: Simulations -Workflow 17
Abbildung 8: Modell der Komponenten und Systeme 19
Abbildung 9: Arbeitsplan zur Lebenszyklusanalyse 20
Abbildung 10: BESS - relative LCIA-Ergebnisse (funktionale Einheit: 2 Batterieräume und die gesamte Energieumwandlungseinheit) 21
Abbildung 11: End-of-Life-Optionen für das BESS 23
Abbildung 12: GWP des BESS (10 MWh) einschließlich verschiedener Szenarien für das Recycling der Zellen 24
Abbildung 13: Kapazität in Abhängigkeit von den äquivalenten Vollzyklen (engl.: Equivalent Full Cycles, EFC); DDE-Zellen (links), DDP-Zellen (Mitte) und DDF-Zellen (rechts) 26

Tabellen

Tabelle 1: Schiffsdaten AIDAprima 5
Tabelle 2: Batteriesimulationen unter ausgewählten Anwendungsfällen 18
Tabelle 3: GWP 100 [kg CO2eq] und Nutzen in 2030 – absolute Werte auf BESS-Ebene (zwei Batterieräume und Power Conversion) 23
Tabelle 4: Betrachtete Batteriezellen im Projekt 26

Abkürzungsverzeichnis

AP ..... *Acidification Potential*

BESS ..... *Battery Energy Storage System, Batter Engery Storage System*

BMS ..... *Battery Management System*

EFC ..... *Equivalent Full Cycles*

EMS ..... *Energy Management System*

EOL ..... *End of Life*

EP ..... *Eutrophication Potential*

ESCS ..... *Energy Storage Control System*

ESS ..... *Energy Storage System*

GWP ..... *Global Warming Potential*

GWP100 ..... *Global Warming Potential (100 years)*

HIL ..... *Hardware-in-the-Loop*

ifeu ..... *Institut für Energie- und Umweltforschun*

IMO ..... *International Maritime Organization*

LCA ..... *Life-Cycle-Assessment*

LCIA ..... *Life Cycle Impact Assessment*

NOx ..... *Nitrogen Oxides*

PM ..... *Particulate Matter*

PMS ..... *Power Management System*

RUL ..... *Remaining Useful Life*

SFOC ..... *Specific Fuel Oil Consumption*

SOC ..... *State of Charge*

SOH ..... *State of Health*

SOx ..... *Sulphur Dioxide*

1 Zusammenfassung

Im Jahr 2022 hat die Carnival Maritime GmbH, das bislang größte Batteriespeichersystem in der Passagierschifffahrt mit einer Kapazität von 10 MWh auf dem Kreuzfahrtschiff AIDAprima installiert und geht damit einen weiteren großen Schritt in Richtung des Nachhaltigen Betriebes von Kreuzfahrtschiffen.[1] Als Teil der Carnival Corporation fungieren wir als Marine Service Unit für die Marken AIDA Cruises und Costa Crociere mit dem Ziel, einen sicheren und nachhaltigen Schiffsbetrieb zu gewährleisten. Dies erreichen wir durch die Förderung von Best Practices, Effizienzsteigerungen und die Integration innovativer Technologien.

Abbildung 1: Kreuzfahrtschiff AIDAprima

Tabelle 1: Schiffsdaten AIDAprima

Delivery	2016	**Length**	299 m	**Pax Cabins**	1 643
Yard	Mitsubishi Heavy Industries	**Beam**	37.6 m	**Crew**	950
Port of Registry	Genoa, Italy	**Size**	124 500 GT	**Engines**	3x MaK 43C
Class	Hyperion	**Max Speed**	22kn		1x MaK 46DF
Sister	AIDAperla	**Design Speed**	17 kn	**Installed Power**	48 000 kW

Derzeit besteht ein erheblicher Druck zur Reduzierung von Emissionen und dem Einsatz umweltfreundlichere Technologien im Seeverkehr. Dies geht einher mit globalen Anforderungen der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation (engl.: International Maritime Organization, IMO) an die Energieeffizienz sowie mit globalen und regionalen Grenzwerten für die Luftverschmutzung durch Schiffe (MARPOL-Annex VI). Darüber hinaus werden mehrere Null-Emissions-Zonen auf See eingeführt. Damit besteht sowohl ein erheblicher gesellschaftlicher als auch rechtlicher Druck Emissionen zu verringern und eine umweltfreundlichere Schifffahrt zu fördern.

[1] https://www.aida.de/aida-cruises/presse/pressearchiv/newsdetails/esg-shipping-awards-gold-fuer-aida-cruises-fuer-innovatives-lithium-ionen-batterie-speichersytem-auf-aidaprima.24494.html

Die Nutzung von Batteriesystemen zur Energiespeicherung an Bord bietet in vielen Bereichen der Schifffahrt eine attraktive Alternative. Sowohl wirtschaftlich, mit erheblichem Potenzial für Kosteneinsparungen, als auch aus ökologischer, regulatorischer und gesellschaftlicher Perspektive eröffnen sich Vorteile. Allerdings muss die Sicherheit batteriebetriebener Schiffe gewährleistet sein. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, den Energiebedarf für einen sicheren und zuverlässigen Antrieb, die Manövrierfähigkeit und den Betrieb zu jedem Zeitpunkt zu decken. Daher sind eine präzise Schätzung und Vorhersage der in der Batterie gespeicherten Energie von entscheidender Bedeutung.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

2.1 Aufgabenstellung

Das vorliegende Projekt DDD-BATMAN zielte darauf ab, datengesteuerte Methoden zur Prognose des Alterungsverhaltens von Batteriesystemen zu entwickeln und Mittel zur Verifizierung des Gesundheitszustands (engl.: State of Health, SOH) basierend auf Echtzeit-Sensormessungen bereitzustellen. Aktuell verfügbare Analysemodelle bieten nur begrenzte Sicherheit bei der Berechnung der verfügbaren Restenergie im Batteriesystem. Eine solche Validierung erfolgt derzeit durch jährliche Kapazitätstests, die jedoch Einschränkungen mit sich bringen und oft eine vorübergehende Außerbetriebnahme des Schiffes erfordern. Kontinuierliche Sensormessungen sollen genauere und zuverlässigere Schätzungen des SOH ermöglichen, indem sie Schwankungen bei Ladung, Temperatur und Entladungstiefe berücksichtigen.

Maritime Batteriesysteme werden in der Regel für eine Lebensdauer von 10 Jahren ausgelegt, während Schiffe für 25-30 Jahre konzipiert sind. Wenn Batteriesysteme das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen, wird eine präzise Einschätzung des SOH zunehmend wichtiger. Darüber hinaus wird die korrekte Bestimmung der Restnutzungsdauer (engl.: Remaining Useful Life, RUL) erhebliche finanzielle und sicherheitsrelevante Auswirkungen haben und den Betreibern von batteriebetriebenen Schiffen mehrere Vorteile bieten:

- Mögliche Vermeidung der Notwendigkeit für jährliche Kapazitätstests
- Verbesserte Prognosen und Vorhersagen zur verbleibenden RUL der Batterie
- Echtzeitüberwachung des SOH des Batteriesystems zur Förderung präventiver Wartungsstrategien und Reduzierung von Ausfallzeiten
- Steigerung der Sicherheit und Zuverlässigkeit batteriebetriebener Schiffe durch präzisere Vorhersagen darüber, wann es nicht mehr sicher ist, sich auf Batterien für kritische Operationen zu verlassen
- Unterstützung bei Entscheidungen: Identifizierung und Vermeidung von Betriebsprofilen, die zu einer schnelleren Degradation der Batterien führen, sowie Evaluierung von Kraftstoffeinsparungen im Vergleich zur Batteriedegradation für verschiedene Betriebsarten
- Verbesserung des Lebenszyklusmanagements von Batteriesystemen an Bord von Schiffen

Operative Daten wurden im Rahmen des Projekts von in Betrieb befindlichen Schiffen gesammelt, ergänzt durch Erkenntnisse aus Labortests unter variablen Bedingungen. Das Vorhaben soll neue Standards für Zuverlässigkeit und Lebensdauerprognosen setzen, Empfehlungen aussprechen und Input für Standards, empfohlene Verfahren und Klassenregeln liefern.

2.2 Zielsetzung von Carnival Maritime

Vor dem beschriebenen Hintergrund hat sich Carnival Maritime klare Ziele gesetzt, die im Folgenden näher erläutert werden. Das Hauptaugenmerk lag darauf, den ökonomischen, ökologischen und sicherheitstechnischen Nutzen von Großbatterien auf Kreuzfahrtschiffen zu demonstrieren und zu maximieren. Durch gezielte Maßnahmen sollten sowohl die Sicherheit bei der Installation und Nachrüstung als auch der Betrieb von Batteriesystemen verbessert werden. Dadurch sollten nicht nur das Vertrauen in die Technologie gestärkt, sondern auch potenzielle Risiken minimiert werden.

Ein besonderer Fokus lag darauf, die Strecke während des emissionsfreien Hafenanlaufs auf 100% Batterieantrieb zu maximieren. Zusätzlich wurde eine umfassende Bewertung des umwelttechnischen Nutzens der Installation durchgeführt. Dabei wurden nicht nur direkte Emissionsreduktionen berücksichtigt, sondern auch End-of-Life-Optionen für Batterien sowie eine qualitative Bewertung weiterer Auswirkungen betrachtet.

Das Projekt zielte darauf ab, die Motivation für weitere Installationen innerhalb der Flotte von Carnival und darüber hinaus zu steigern. Durch die erfolgreiche Demonstration des vollen Emissionsminderungspotenzials der Technologie sollte ein Anreiz geschaffen werden, sie in einem breiteren Kontext einzusetzen und somit einen bedeutenden Beitrag zur Reduzierung der Emissionen und zur Verbesserung der Umweltbilanz zu leisten.

Basierend auf dieser übergeordneten Zielsetzung wurden die folgenden SMARTen Ziele für Carnival Maritime abgeleitet:

SMARTes Vorhabenziel:	Durch das vorliegende Vorhaben sollen der ökonomische, ökologische und sicherheitstechnische Nutzen von Großbatterien auf Kreuzfahrtschiffen demonstriert und erhöht werden. Hiermit soll die Motivation für weitere Installationen innerhalb der Flotte von Carnival und darüber hinaus gesteigert werden, um letztlich das volle Emissionsminderungspotential der Technologie auszuschöpfen. Hierfür werden im Einzelnen verfolgt: - Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit bei der Installation bzw. Nachrüstung und des Betriebes von Batteriesystemen. - Die Maximierung der überbrückbaren Distanz im emissionsfreien Hafenanlauf (100% Batterieantrieb). - Die Bewertung des ganzheitlichen umwelttechnischen Nutzens der Installation. Spezifisch werden innerhalb der Projektlaufzeit im Arbeitspaket erreicht: 1. Die Methoden von Hardware in the Loop testing (HIL) für eine Batterienachrüstung wurden demonstriert und damit die Fehlereintrittswahrscheinlichkeit im Schiffsbetrieb reduziert (Eine Liste von vorab identifizierten Fehlern, die damit im Test/Realbetrieb vermieden werden wird erstellt)

	2. Eine Schiffssimulation ermöglicht es, den Energiebedarf bis zum Anlegemanöver mit einer Fehlertoleranz von 15% vorherzusagen, somit kann der Umschaltzeitpunkt auf null Emissionsbetrieb maximiert werden, ohne dass im Manöver sicherheitstechnische Probleme auftreten. Des Weiteren wurden Lösungsvorschläge erarbeitet, wie der Zeitbedarf für den Anschlussvorgang auf Landstrom von 30 Minuten auf maximal 10 Minuten reduziert werden kann. Insgesamt kann so die Zeitspanne des Batteriebetriebs im Manöver ungefähr verdoppelt werden. 3. Der umwelttechnische Nutzen der Installation wurde durch eine Lebenszyklusanalyse (engl.: Life-Cycle-Assessment, LCA) verlässlich quantifiziert. Dies umfasst auch die End of Life Analyse der ausgedienten Zellen.

2.3 Übergeordnete Ziele

Das Ziel des Verbundvorhabens bestand darin, die Anwendung von Batterien auf Kreuzfahrtschiffen zu optimieren, indem folgende Aspekte berücksichtigt wurden:

- Die effiziente Nutzung der für die Batterieproduktion benötigten Rohstoffe und finanziellen Ressourcen, insbesondere im Hinblick auf die Lebensdauer der Zellen.
- Die Gewährleistung der Sicherheit im Schiffsbetrieb, sowohl im reinen Batteriebetrieb als auch im Hybridbetrieb.
- Die Optimierung des Potenzials zur Reduzierung sowohl lokaler als auch globaler Luftschadstoffe.

Durch diese Maßnahmen sollte die Akzeptanz und Anwendung von Batterien im maritimen Sektor gefördert werden, wodurch das mögliche Potenzial zur Emissionsminderung der Technologie vollständig ausgeschöpft werden konnte.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im Rahmen dieses Vorhabens folgende Aspekte in den Fokus gerückt:

1. Eine optimierte Betriebsstrategie an Bord von (Kreuzfahrt-) Schiffen zur Verlängerung der Zellnutzungsdauer von Batterien.
2. Eine verlässliche Bestimmung der verfügbaren Energie (engl.: State of Charge, SOC) und Restlebensdauer der Batterie.
3. Die wissenschaftliche Begleitung der Nachrüstung eines Batteriegroßsystems auf dem Schiff AIDAprima, um den Nutzen der Installation zu demonstrieren und verbesserte Strategien für die Installation und den sicheren Betrieb zu entwickeln.

Die Ziele wurden wie folgt konkretisiert:

Zunächst wurden durch Simulationen und den Vergleich verschiedener Betriebsszenarien und Parameter Maßnahmen entwickelt, um die Zelllebensdauer um mindestens 10% zu erhöhen.

Des Weiteren sollte die verfügbare Energie in der Batterie (SOC und SOH) mit einem Fehler von weniger als 5% abgeschätzt werden können. Durch eine Schiffssimulation war beabsichtigt, den Energiebedarf für den

Manöverbetrieb zu ermitteln, um sicherzustellen, dass der Umschaltvorgang auf den Null-Emissions-Betrieb weniger als 10% Reserveenergie in der Batterie erfordert.

Eine weitere wichtige Zielsetzung betraf die Strategie für die Batterienachrüstung und den Betrieb. Hierzu gehörte die zuverlässige Quantifizierung des umwelttechnischen Nutzens der Installation durch eine Lebenszyklusanalyse (LCA). Die Demonstration der Methoden des Hardware-in-the-Loop-Tests (HIL) zur Batterienachrüstung, um die Fehlereintrittswahrscheinlichkeit im Schiffsbetrieb zu reduzieren sowie Lösungsansätze zu erarbeiten, um den Zeitbedarf für den Anschlussvorgang an Landstrom auf maximal 10 Minuten zu minimieren.

3 Voraussetzungen und Projektverlauf

Das Projektkonsortium setzte sich aus verschiedenen Interessengruppen der maritimen Industrie zusammen, darunter die Klassifikationsgesellschaft DNV, Corvus Energy, ein führender Anbieter von maritimen Energiespeichersystemen, die Fraunhofer-Gesellschaft, Europas größtes Institut für angewandte Forschung, sowie Carnival Maritime in Zusammenarbeit mit AIDA Cruises als Reeder.

Dank der umfassenden Expertise und Vielfalt der beteiligten Partner konnte davon ausgegangen werden, dass das Konsortium über die bestmögliche Qualifikation verfügte, um die festgelegten Projektziele erfolgreich zu erreichen.

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, lag das Hauptziel dieses Projekts in der Entwicklung und Validierung datengestützter Methoden zur Abschätzung und Vorhersage der Degradation und des SOH von Batteriesystemen an Bord von Schiffen. Zusätzlich wurden weitere Aspekte im Zusammenhang mit der Verwendung von Batterien für eine sichere, zuverlässige und umweltfreundliche Schifffahrt behandelt. Um die Projektziele zu erreichen, mussten mehrere Herausforderungen bewältigt werden, die in verschiedenen Arbeitspaketen behandelt wurden. Alle Partner waren an sämtlichen Arbeitspaketen beteiligt und übernahmen die Leitung bestimmter Arbeitspakete, wie im Folgenden beschrieben.

Abbildung 2:Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten

Die Projektumsetzung und die Nutzung von Ressourcen haben sich im Allgemeinen im Rahmen des Projektplans und des Projektbudgets bewegt. Einige Partner haben jedoch etwas mehr Zeit und Ressourcen als ursprünglich geplant aufgewendet. Die interne Kommunikation innerhalb des Projektkonsortiums hat gut funktioniert, und es gab regelmäßige (wöchentliche oder zweiwöchentliche) Online-Statusbesprechungen sowie physische Projektmeetings, die jeweils von einen der Partner organsiert und ausgerichtet wurden. Die im Projekt gesammelten Daten (aus Laborexperimenten und Schiffen im Einsatz) wurden über die DNV Veracity-Datenplattform geteilt.

3.1 Projektplan von Carnival Maritime

Das Projekt DDD-BATMAN ist gemäß Abbildung 2 in sieben Arbeitspakete unterteilt. Nachfolgend finden Sie die Arbeitspakete, in denen Carnival Maritime durch eigene Zielverfolgung, direkte Mitarbeit oder eigenverantwortliche Beteiligung aktiv involviert war.

AP 1: Datenerfassung und Bereitstellung (englische Bezeichnung MarTERA: Operational Data Collection and Sharing)

- AP 1.1: Datenidentifikation
- AP 1.2: Datenerfassung und Bereitstellung der identifizierten Datenströme
    - Bereitstellung von Betriebsdaten des Schiffes und des Batteriesystem durch das von Siemens betriebene Automationssystem
    - Datenübermittlung an Land und Zugang landseitig verfügbarer Daten
    - Bereitstellung zusätzlicher Sensorik und Infrastruktur zur Erfassung und Übermittlung von Datenströmen im Falle von Informationslücken im Laufe des Projekts

AP 2: Evaluation und Verbesserung der Batterielebensdauer (englische Bezeichnung MarTERA: Battery Service Life Investigation)

- AP 2.3: Ergebnisverwertung: Modellierung der Zelle
    - Bereitstellung betrieblicher und wirtschaftlicher Einblicke in den Schiffsbetrieb, um Zielgrößen für die Optimierung festzulegen

AP 3: Datenbasierte Modellierung der nutzbaren Batteriekapazität (englische Bezeichnung MarTERA: Statistical Data Analysis and Modelling)

- AP 3.4 Untersuchung des statistischen Modells, Auswahl des Modells und Validierung
    - Bereitstellung von Betriebsdaten des Schiffes und des Batteriesystems
    - Bereitstellung des Batteriesystems für die Evaluation der Prognosemodelle

AP 4: Fallstudie: Batterien in der Kreuzfahrtindustrie (englische Bezeichnung MarTERA:Case study: Batteries for the cruise industry)

- AP 4.1: Erfassung und Bereitstellung von Betriebsdaten des Schiffes und des Batteriesystems
- AP 4.2: Optimierung der Batterielebensdauer und Austauschstrategien
- AP 4.3: Life Cycle Assessment
- AP 4.5: Hardware in the Loop Tests (HIL) zur Gewährung der Betriebssicherheit

Die Bearbeitung dieser Arbeitspakete sollte gemäß dem ursprünglich geplanten Verlauf des DDD-BATMAN-Projekts, wie im Projektantrag in Abbildung 3 dargestellt, erfolgen.

| | | |

3.2 Projektumsetzung und Ressourcennutzung

Ursprünglich war geplant, das Batteriesystem auf dem Kreuzfahrtschiff AIDAperla zu installieren. Jedoch wurde schließlich entschieden, es stattdessen auf dem Schwesterschiff AIDAprima umzusetzen. Diese Entscheidung wurde durch die geplanten Fahrgebiete des Schiffes sowie die Verfügbarkeit ungenutzter Wassertanks auf der AIDAprima beeinflusst, deren Räume sich optimal für die Installation eigneten. Trotz dieser Änderung hatte sie keinen Einfluss auf das Gesamtprojekt.

Zu Beginn des Projekts gab es aufgrund der Corona-Pandemie einige Herausforderungen und Verzögerungen. Dies führte unter anderem dazu, dass die Kreuzfahrtindustrie von März 2020 bis Mitte 2021 weitgehend stillstand. Diese Situation brachte speziell für Carnival Maritime folgende Hürden mit sich:

- Die Außerbetriebnahme und Unzugänglichkeit der Schiffe zur Minimierung des Infektionsrisikos für die Schiffsbesatzung führten dazu, dass der Zugang nur in begründeten Ausnahmefällen gestattet wurde. Dies erschwerte die Planung und führte zu Verzögerungen bei der Ausführung und Inbetriebnahme der Batterieinstallation auf der AIDAprima.
- Es traten erhebliche logistische Herausforderungen auf, insbesondere bei der Lieferung von Systemen und Hardware zu den Schiffen, da diese sich teilweise im Ausland und oder auf Reede befanden.
- Ein Großteil der Belegschaft befand sich in Kurzarbeit und es wurden Kapazitätsanpassungen vorgenommen. Dies führte aufgrund fehlender Arbeitskapazitäten zu erheblichen Engpässen in der Umsetzung von Projekten aufgrund fehlender Arbeitskapazitäten.
- In der zweiten Jahreshälfte 2021 wurde die Flotte schrittweise wieder in Betrieb genommen. Dies stellte jedoch erneute Hindernisse für das Batterieprojekt und die damit verbundenen Arbeiten im Vorhaben DDD-BATMAN dar. Die Wiederaufnahme des Betriebs erforderte eine enorme Arbeitsintensität, um die Schiffe für den Betrieb vorzubereiten. Dazu gehörten die Besatzung der Schiffe, die Inbetriebnahme der Schiffssysteme und Reinigungsarbeiten an den Außenhüllen und Propellern, die aufgrund der langen Liegezeiten der Schiffe stark bewachsen waren. Dies kollidierte mit der personellen Knappheit durch drastische Kapazitätsanpassungen während der Pandemie, die nicht schnell kompensierbar waren. Der wirtschaftliche Druck nach der langen, finanziell belastenden Betriebspause erforderte eine klare Priorisierung und Fokussierung auf eine schnelle Wiederaufnahme des Betriebs, was dazu führte, dass alle nicht für den „Rampup“ essenziellen Arbeiten ruhen mussten.

Echtzeitdaten des Batteriesystems der AIDAprima waren innerhalb des Projektzeitrahmens nicht verfügbar, da es wie oben beschrieben zu Verzögerungen bei der Inbetriebnahme des Energiespeichersystems (engl.: Energy Storage System, ESS) und der Aufnahme des Betriebs kam. Daher war es notwendig, verstärkt auf simulierte Daten und Modelle zurückzugreifen. Corvus leistete hierbei einen signifikanten Beitrag, indem sie umfassende Datensätze aus anderen maritimen Batterieprojekten bereitstellten, während Carnival Maritime mit einem breiten Spektrum an schiffspezifischen und hochaufgelösten Sensordaten von den relevanten Verbrauchern an Bord unterstützte.

Infolge der oben genannten Herausforderungen musste die Gesamtprojektlaufzeit um ein halbes Jahr auf insgesamt 3,5 Jahre verlängert werden. Abgesehen davon verlief die Umsetzung des Projekts und die Nutzung der Ressourcen aber größtenteils wie geplant. Im Weiteren sollen der Verlauf der einzelnen Arbeitspakete von Carnival Maritime reflektiert werden.

3.3 Verlauf der einzelnen Arbeitspakete

3.3.1 AP 1: Datenerfassung und Bereitstellung

Arbeitspaket 1, unter der Leitung von Corvus, umfasste die Bereitstellung von Betriebsdaten, die für die Datenanalyse im Rahmen des Projekts von Bedeutung waren. Die erste Aufgabe war die Überprüfung der verfügbaren historischen Daten sowie die Identifizierung der Referenzschiffe. Anschließend wurde festgelegt, welche Parameter relevant waren und wie diese erfasst werden sollten. Es wurde ein gezieltes Erfassungssystem für die relevanten Parameter der ausgewählten Schiffe implementiert, wobei verschiedene Strategien zur Datenerfassung untersucht wurden. Abhängig von der Verbindung zwischen Schiff und Land wurde die optimale Strategie der Datenübertragung entweder Live- Schnittstelle oder als periodisches Daten-Dumping festgelegt. Die Untersuchung verschiedener Möglichkeiten, Rohdaten vor der Übertragung zusammenzuführen und zu komprimieren, ermöglichte auch die Umsetzung unter schlechten Verbindungsbedingungen. Herausforderungen im Zusammenhang mit der Cybersicherheit wurden adressiert, und so eine sichere und zuverlässige Datenübertragung eingerichtet. Darüber hinaus wurde in diesem Arbeitspaket der Bedarf an gemeinsamen Datenformaten und Standardisierung untersucht.

3.3.2 AP 2: Evaluation und Verbesserung der Batterielebensdauer

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 unter der Leitung von Fraunhofer wurden Labortests von Batteriezellen und -modulen durchgeführt, um Daten über Alterungs- und Degradationsmechanismen zu erhalten. Es wurden „beschleunigte“ Lebensdauertests durchgeführt, um Prognosen und RUL-Vorhersagen für Batteriesysteme zu ermöglichen. Die Tests wurden unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt, um statistische Modelle zu entwickeln, die feststellen können, welche Faktoren die Degradierung der Batterien beeinflussen und in welchem Ausmaß. Ein Labortest unter kontrollierten, variierenden Bedingungen ergänzte die Alterungsstudie und verifizierte den Beitrag der Alterungsfaktoren. Zudem wurden verfügbare, relevante Testdaten aus früheren Experimenten genutzt.

3.3.3 AP 3: Datenbasierte Modellierung der nutzbaren Batteriekapazität

Im Verlauf dieses Arbeitspakets wurden datengesteuerte Modelle zur Überwachung des SOH und der verfügbaren Energie auf Basis von Zeitreihen von Betriebsdaten unter der Leitung des DNV untersucht und entwickelt. Es wurden verschiedene statistische Modelle und Maschine Learning Techniken erforscht, um die Beziehung zwischen den Sensormessungen und den Degradationsmechanismen der Batterien zu erfassen. Des Weiteren wurden prädiktive Modelle auf Basis von prognostizierten Betriebsprofilen untersucht und Prognosemodelle zur Schätzung der Restnutzungsdauer entwickelt.

3.3.4 AP 4: Fallstudien: Batterien in der Kreuzfahrtindustrie

In dem Arbeitspaket 4 übernahm Carnival Maritime die Leitung. AP 4 konzentrierte sich auf Batteriesysteme für Kreuzfahrtschiffe und umfasste eine Konzept- bzw. Machbarkeitsstudie sowie eine Lebenszyklusanalyse von Batteriesystemen. Es wurden spezifische Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Batterieschiffen angesprochen, darunter Fragen des Batteriemanagements in Bezug auf Betrieb, Wartung und Lebensdauer der Batteriesysteme. Eine wesentliche Aufgabe innerhalb dieses Arbeitspakets bestand darin, Betriebsdaten von einem Kreuzfahrtschiff zu erfassen, die dann in AP 3 analysiert wurden.

3.3.4.1 Gewährung der Betriebssicherheit des Schiffes während und nach der Installation

Das Batteriesystem der AIDAprima umfasst Batterien mit einer Kapazität von 10 MWh. Die Installation des Systems wurde während des laufenden Schiffsbetrieb ohne Trockendockung durchgeführt. Um die Betriebssicherheit des Schiffes zu gewährleisten und eventuelle Störungen bereits vor der Integration des Batteriesystem in die Automation des Schiffes zu identifizieren, kamen vorbereitend und begleitend zu der Installation des Hardware-in-the-Loop (HIL)-Ansätze zum Einsatz. Der Forschungscharakter bestand nicht in der Entwicklung des HIL-Verfahrens selbst, sondern in der Anwendung des HIL-Verfahrens für die Begleitung einer Batterieinstallation in der äußerst komplexen Maschinenanlage eines Kreuzfahrtschiffes.

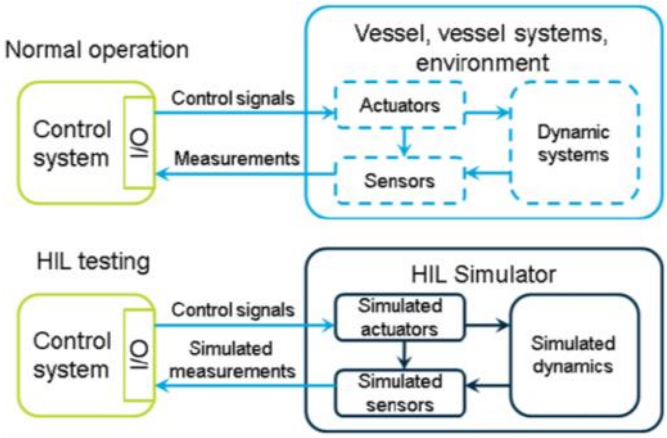


Abbildung 4: Schematische Darstellung des HIL-Prinzips

Anders als zu Beginn des Projektes geplant, ergab sich durch die parallele, rein kommerzielle Realisierung des Batterieprojektes auf dem Versuchsträger AIDAprima, dass die Projektpartner jeweils Teilleistungen des HIL-Testings selbstständig zwecks Qualitätssicherung durchführen mussten und somit der Leistungsumfang des Drittanbieters DNV Maritime Advisory reduziert wurde und sich wie im Folgenden beschrieben, darstellte.

- Durchsicht der System- und Funktionsanforderungen anhand der Dokumentation des Batterieherstellers, Systemintegrator und Partner für die Modifizierung des Power Management System (PMS) und die Automation.
- Überprüfung der Testprogramme der Projektpartner vor der Testaktivität
- Teilnahme an der Inbetriebnahme des HIL-Aufbaus im Labor des Integrationspartners, um einen Überblick über den Testaufbau und seine Möglichkeiten und Grenzen zu erhalten
- Erarbeitung zusätzlich durchzuführender Tests
- Bewertung des Gesamtsystem und der Testaktivitäten einer professionellen Prüforganisation, die nicht mit dem Hersteller verbunden ist, mit dem Ziel eine effiziente und sichere Inbetriebnahme an Bord zu gewährleisten.

Ein Simulator, in dem alle Grundfunktionen der Maschinenanlange und die Betriebsumgebung modelliert wurden, wurde erstellt und das Steuerungssystem der Batterie unter realnahen Bedingungen geprüft. Die Simulation wurde mit einer Kombination aus Simulationstechnologien von Typhoon HIL® durchgeführt. Es wurden zwei Testprotokolle erstellt, eines vom Integrationspartner ABB und eines von Siemens für PMS uns

Automation. Das Ziel der Aktivität war es, die in den Testprotokollen festgelegten Tests durchzuführen und zu überprüfen, ob das integrierte System aus PMS und Energy Storage Control System (ESCS) gemäß der Spezifikation funktionierte. Die Topologie des Laboraufbaus ist in Abbildung 5 dargestellt.

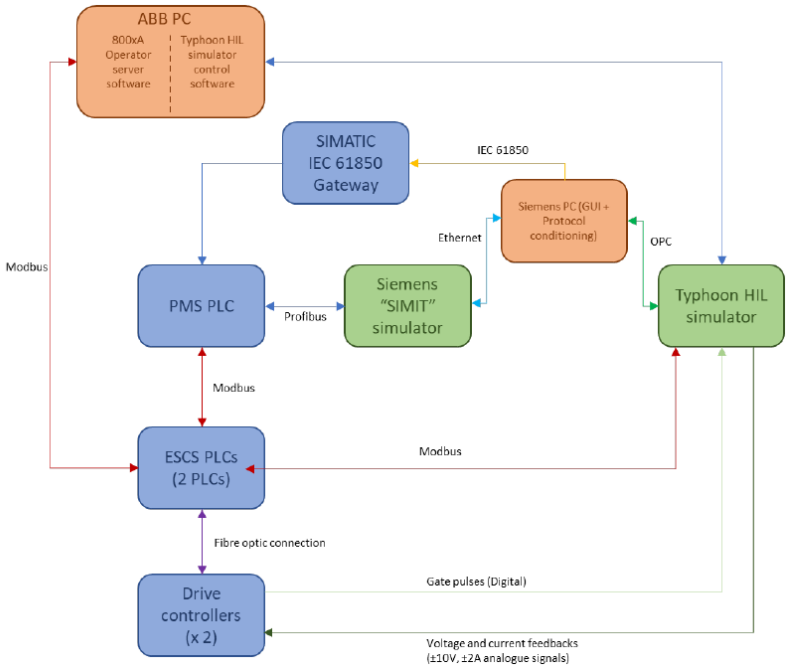


Abbildung 5: HIL-Labor-Hardware-Konfiguration

Die durchgeführten HIL-Untersuchungen spielten eine entscheidende Rolle bei der sicheren Integration des Batteriespeichersystems. Die Maßnahmen und Bedeutung der durchgeführten HIL-Untersuchungen werden im Folgenden zusammengefasst.

Das Batteriesystem wurde in einer simulierten Testumgebung unter extremen sowie fehlerhaften Bedingungen getestet. Dadurch konnten komplexe Test verkürzt und potenzielle Fehler vor der Installation an Bord identifiziert werden, wodurch das Risiko nachträglich auftretender Probleme minimiert wurde. Weiterhin erlaubte die frühzeitige Überprüfung der Integration und Fehlerbehebung zwischen bestehenden und neuen Systemen, Integrationsprobleme des Batteriemanagementsystems (engl.: Battery Management System, BMS) und des Energiemanagementsystems (engl.: Energy Management System, EMS) vor der Inbetriebnahme zu klären und mögliche Ausfälle des Schiffes im Betrieb zu vermeiden. Der reduzierte Zeitaufwand bei der Inbetriebnahme der Systeme an Bord und die minimierten Betriebsstörungen stellen bedeutende Vorteile dar. Simulationen und der Einsatz von Modellen für Funktionstests und -erweiterungen während des Betriebs reduzierte den Bedarf an Softwareingenieuren zur Fehlerbehebung an Bord und kann auch für zukünftige Batterieinstallation auf anderen Schiffen mit lediglich geringfügigen Anpassungen zum Einsatz kommen. Insbesondere bei einer Pilotinstallation mit straffem Zeitplan und hoher Sichtbarkeit war es entscheidend, Integrationsprobleme in einer simulierten Testumgebung an Land zu identifizieren und zu lösen, um eine reibungslose Inbetriebnahme an Bord sicherzustellen.

Das HIL-Verfahren konnte erfolgreich durchgeführt werden, Fehler im Vorfeld der Installation detektiert und Störungen bei der Verbindung des Systems mit der Bordautomation vermieden werden. Die hieraus gewonnen Erkenntnisse sind wertvolle Erfahrungen, um weitere mögliche Installationen von Batteriesystemen in der Flotte vorzubereiten. Durch die Anwendung des HIL-Verfahrend kann das PMS der Schiffe erprobt und weiterentwickelt werden. Durch die Erprobung der HIL-Methode lässt sich eine

standardisierte Herangehensweise bei der Installation von Batteriesystemen im Neubau sowie für Nachrüstungen in der Flotte entwickeln. In diesem Zusammenhang werden Hürden und Kosten solcher Batteriespeicherinstallationen gesenkt und ebnen somit den Weg für eine breite Anwendung der Batterietechnologie in der Flotte und auch außerhalb des Carnival Konzerns.

3.3.4.2 Optimierung der Batterielebensdauer und Austauschstrategien

Für die Einführung einer neuen Technologie, sei es im Rahmen eines Umrüstungsprojekts oder eines Neubaus, ist eine langfristige Planung entscheidend. Dazu gehört insbesondere die finanzielle Planung über die gesamte Lebensdauer der Batterie, einschließlich des Zeitpunkts und der Kosten für den Austausch am Ende ihrer Nutzungsdauer. Kreuzfahrtschiffe operieren in unterschiedlichen Betriebsarten und Klimazonen, daher erfordert es ein detailliertes Verständnis und ein Überwachungskonzept, um den Zustand der Batterie vollständig und verlässlich zu bestimmen. Ein zentrales Ziel ist es, die effektive Nutzungsdauer der Batterienachrüstung zu optimieren, um die wirtschaftlichen und ökologischen Kosten für deren Austausch zu minimieren.

Für dieses spezifische Batterie-Nachrüstungskonzept und das damit verbundene Schiffsbetriebsmuster wurde eine Betriebsstrategie zur Erhöhung der Batterielebensdauer entwickelt. Diese Strategie umfasst die Nutzung der Batterie zur Spitzenlastreduzierung, als Spinning-Reserve, zur Verlagerung des Kraftstoffverbrauchs sowie für den Betrieb des Schiffes im reinen Batteriebetrieb über einen begrenzten Zeitraum. Die Grundlage bildet eine Multiparameter-Optimierung, die folgende Aspekte berücksichtigt:

- die Kosten für den Batteriewechsel in Relation zur Lebensdauer,
- die eingesparte Energie durch die intelligente Nutzung des zusätzlichen Freiheitsgrades der Batteriekapazität
- die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks des Schiffes.

Abbildung 6 zeigt die Installation an Bord des Kreuzfahrtschiffs AIDAprima mit vier Transformatoren auf Deck 1 und dem BESS auf Deck 0.

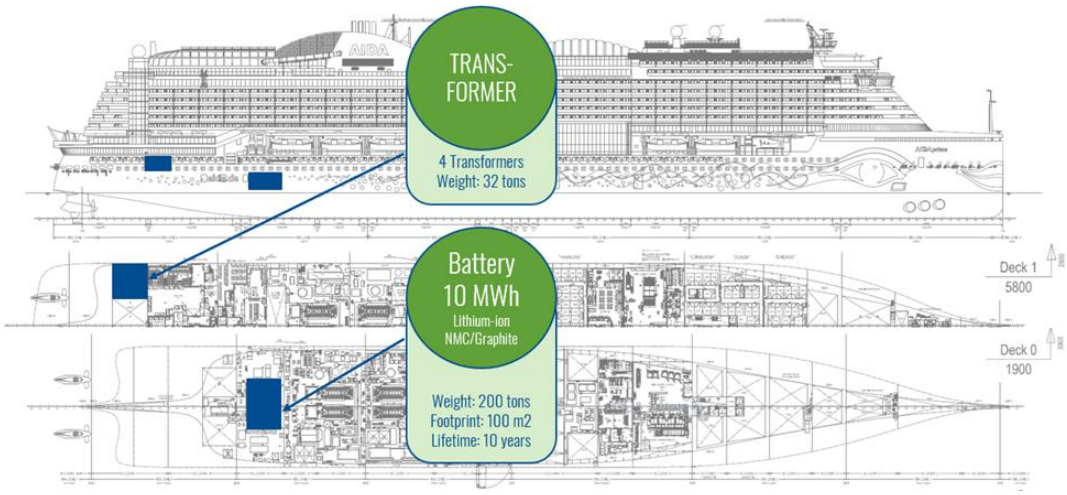


Abbildung 6: BESS Installation auf dem Kreuzfahrtschiff AIDAprima

Moderne Kreuzfahrtunternehmen verfügen über umfassende Betriebsdaten, die systematisch erfasst und idealerweise automatisiert für Analysen genutzt werden sollten. Simulationen erweitern die Einsatzmöglichkeiten dieser Daten, indem sie nicht gemessene Informationen mithilfe von Energiebilanzmodellen bereitstellen und „What-If“-Szenarien unter Verwendung aktueller Modelle ermöglichen. Simulationen spielen eine wichtige Rolle bei den Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit. Angesichts des wachsenden Umweltbewusstseins in der Schifffahrtsbranche bieten simulierte Systeme außerdem realistische Verbrauchsdaten, die zur Bewertung der Energieeinsparungen und Umweltauswirkungen genutzt werden können.

Die Firma Semantum Oy wurde für die erforderliche Simulationsstudie eines batteriebetriebenen Schiffes beauftragt. In enger Zusammenarbeit mit Carnival Maritime wurden die Modellspezifikationen abgestimmt und Simulationsszenarien festgelegt. Die Modelle basierten auf verschiedenen Schiffsbetriebsdaten wie Informationen über gebunkerte Kraftstoffe, den Einsatz von Abgaswäschern, Abgasreinigungssystemen und den Betrieb der Dieselgeneratoren. Zur Bewertung der technischen Leistung und der Berechnung der umweltspezifischen Nachhaltigkeitsauswirkungen bestand das Ziel darin, eine vielseitige Modellbibliothek und Simulationsplattform zu etablieren. Um Möglichkeiten und Randbedingungen für die Betriebsunterstützung und -optimierung zu identifizieren, wurden umfassende systemweite Energiemodelle entwickelt, die dynamische Simulationen verschiedener Routen und Zeitpläne ermöglichten. Abbildung 7 veranschaulicht den Simulations-Workflow.

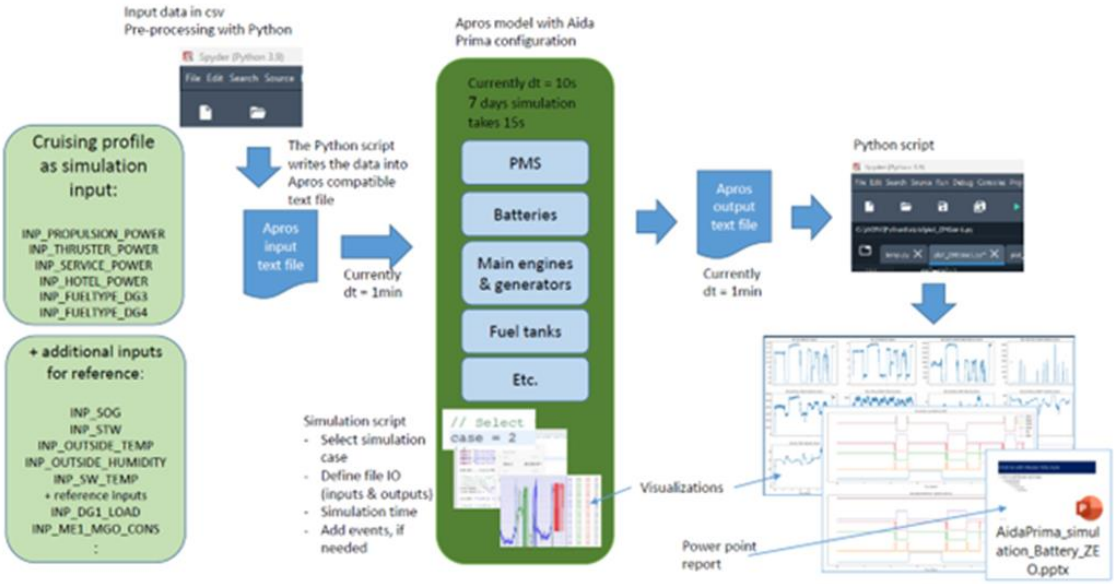


Abbildung 7: Simulations -Workflow

Der Schwerpunkt lag auf einer spezifischen Fallstudie, bei der ein Schiff mit einem 10 MWh Batteriespeichersystem nachgerüstet wurde. Diese Fallstudie beinhaltet eine Vergleichsanalyse zwischen dem Referenzschiff als Basisschiff (Baseline; ohne Batteriesystem) und dem Schiff mit batterieunterstütztem Antrieb. Die Messungen an Bord des Referenzschiffs dienten als Validierungsdaten für die Modelle. Es wurden verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lade- und Entladezyklen für den Batteriebetrieb vorbereitet und simuliert. Das optimale Szenario wurde in der Vergleichsstudie verwendet, um das Verständnis für den Mehrwert des batterieunterstützten Schiffsbetriebs zu vertiefen.

Die wesentlichen Ziele der Simulationsmodelle beinhalteten:

- Planung und Entwicklung der Modellbibliothek im Rahmen der Fallstudie,
- Anwendung der Modellbibliothek, um das Referenzschiff sowohl als Basisschiff als auch als batterieunterstütztes Schiff zu simulieren,
- Simulation verschiedener Szenarien für den batterieunterstützten Schiffsbetrieb, einschließlich Spinning Reserve, Peak Shaving und dem emissionsfreien Betrieb, siehe Tabelle 2,
- Vergleich zwischen dem Basisschiff und dem batterieunterstützten Schiff, um die Vorteile hervorzuheben und potenzielle Herausforderungen zu identifizieren.

Tabelle 2: Batteriesimulationen unter ausgewählten Anwendungsfällen

Use Case	Beschreibung
Zero Emission Mode	Umschaltpunkt vor Hafenanlauf
Charging Mode	Landanschluss
Spinning Reserve 1	Änderung des Startens einen zusätzlichen Motors von ~80% auf 85% oder noch höher. Höhere Geschwindigkeit bei 85% Motorlast, Möglichkeit bestimmte Strecken mit nur zwei Motoren zu fahren, im Vergleich zu drei und später zwei Motoren.
Spinning Reserve 2	Reduzierung der Anzahl der laufenden Motoren während des Manövrierens. Anstelle von drei Motoren möglichst zwei Motoren + Batterien verwenden
Peak Shaving	Batterien bei Spitzenlasten verwenden, um das Anlassen zusätzlicher Motoren zu vermeiden

Die Modellentwicklung erfolgte durch die Nutzung eines leistungsstarken Prozesssimulators mit umfangreichen Bibliotheken zur Modellierung verschiedener Prozesse. Apros® wurde als das Systemsimulationstool ausgewählt, wobei die Vorbereitung und Verfeinerung von Simulationsdaten auch mit anderen Softwarelösungen wie Excel und Python durchgeführt werden kann. Die Simulation umfasste den Betrieb des Schiffes über einen bestimmten Zeitraum. Daher war es entscheidend, sowohl kurzfristige Ereignisse (z. B. Batterie-Transienten) als auch langfristige Faktoren (z. B. Verschmutzung des Schiffsrumpfes, die den Energiebedarf für den Antrieb beeinflusst) bei der Gestaltung der Modellbibliothek und der Planung von Simulationsexperimenten zu berücksichtigen.

Nachstehende Komponenten wurden in das Modell integriert und sind in Abbildung 8 visualisiert:

- Power Management System (PMS)
  - Welche Motoren sind mit welcher Last online
  - Wie die Batterie in verschiedenen Anwendungsfällen genutzt wird
- Hauptmaschinen
  - Kurven Spezifischer Kraftstoffverbrauch (engl.: Specific Fuel Oil Consumption, SFOC), Emissionen, Wärmeerzeugung
- Batterie
- Kraftstofftanks
- Verbrauch der Hilfskessel (engl.: Auxiliary Boiler) im Nullemissionsbetrieb
- Allgemeiner Überblick der Wärmebilanz

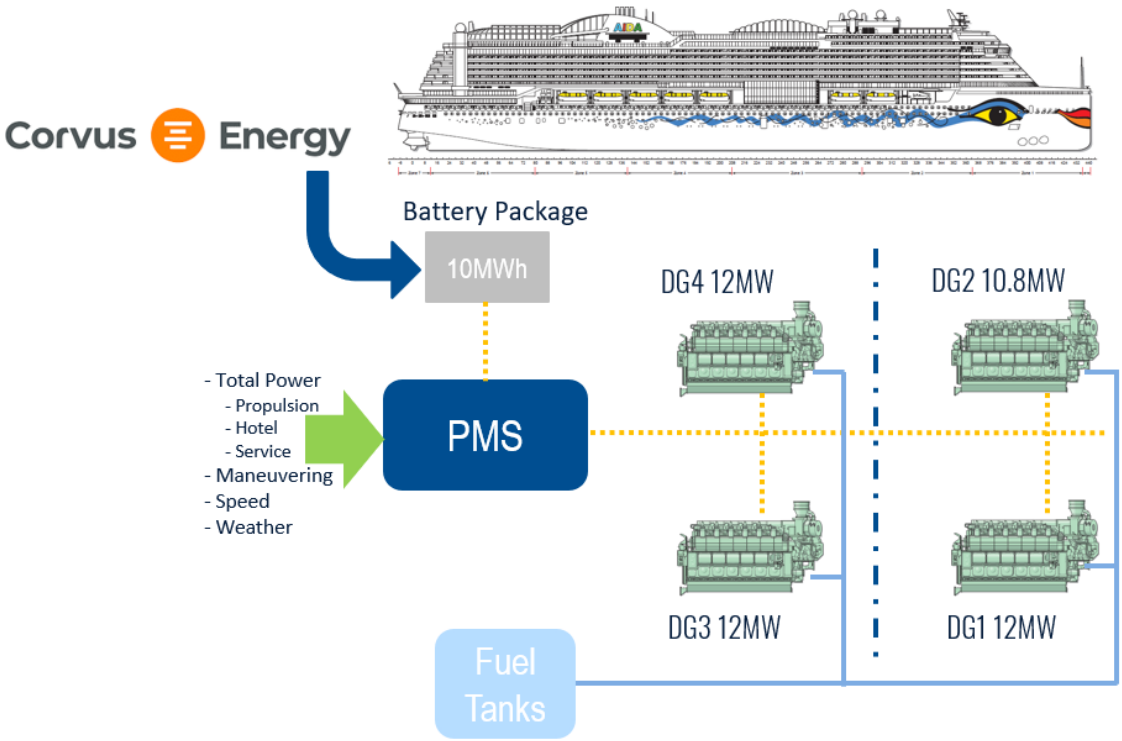


Abbildung 8: Modell der Komponenten und Systeme

Die Ergebnisse der Simulationen umfassen:

- Eine Modellbibliothek mit standardisierten Merkmalen im Rahmen der Fallstudie sowie erste Modellierungsrichtlinien für zukünftige Entwicklungen,
- Basismodelle von Schiffen und ihren Vergleich mit Messdaten,
- Modelle von batterieunterstützten Schiffen und Ergebnisse aus verschiedenen Betriebsszenarien,
- Eine vergleichende Analyse zwischen batterieunterstütztem Schiffsbetrieb und Basisschiffsbetrieb.

Die Ergebnisse bestätigen die Vorteile der Nutzung von dynamischen Simulationen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Verbesserung der Machbarkeitsstudien. Die laufenden Entwicklungsarbeiten werden das Modell durch die Integration zusätzlicher Komponenten erweitern und die Modellbibliothek ausbauen.

3.3.4.3 Objektive Analyse des umwelttechnischen Nutzens der Installation

Die Lebenszyklusanalyse (LCA), die in Zusammenarbeit mit dem ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg durchgeführt wurde, untersuchte die Umweltauswirkungen vor und nach der Nachrüstung eines 10 MWh Batteriespeichersystems auf der AIDAprima. Die Analyse umfasste eine quantitative Bewertung der Umweltauswirkungen sowie eine qualitative Diskussion über zusätzliche Umweltauswirkungen, wie in nachfolgender Übersicht in der Abbildung 9 dargestellt.

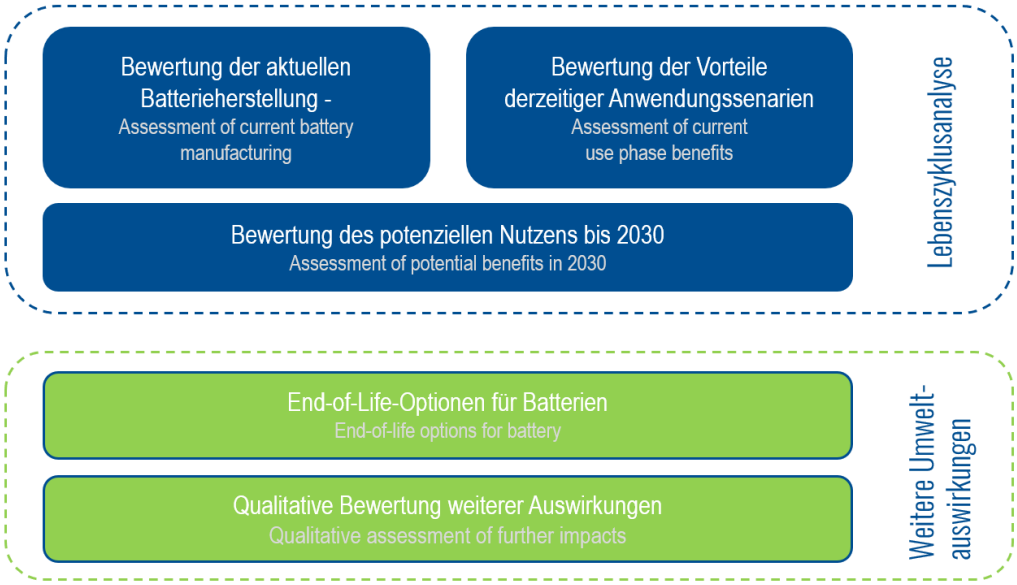


Abbildung 9: Arbeitsplan zur Lebenszyklusanalyse

Der Umfang der Bewertung konzentrierte sich auf die verschiedenen Komponenten der verglichenen Systeme, insbesondere auf die Integration des Batteriespeichersystems und die elektrischen Frequenzumrichter. Ebenso wurden die Veränderungen der Inputs (Energieverbrauch) und Outputs (Emissionsverhalten) in den verschiedenen Anwendungsszenarien betrachtet.

Daher wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Produktion des BESS, einschließlich der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie des Energiebedarfs während der Fertigung.
- Treibstoff- und Emissionseinsparungen durch einen optimierten Schiffsbetrieb mit Effizienzsteigerungen durch den Betrieb des BESS. Dies beinhaltet auch die vorgelagerten Emissionen im Zusammenhang mit der Treibstoffbereitstellung.
- Stromerzeugung für die Landstromversorgung und das Laden der Batterie, einschließlich der Strominfrastruktur, der Kraftstoffversorgung sowie der vorgelagerten Emissionen aus Kraftwerken.

Der Zweck der LCA bestand darin, verschiedene Umwelteffekte auch über die Treibhausgasbilanz hinaus zu vergleichen. Dazu wurden neben dem Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential (100 years), GWP100) auch das Versauerungspotenzial (engl.: Acidification Potential, AP) und das Eutrophierungspotenzial (engl.: Eutrophication Potential, EP) als etablierte Ökobilanzkategorien quantifiziert. Weiterhin wurden Schwefeloxide (engl.: Sulphur Dioxide, SOx) und Stickoxide (engl.: Nitrogen Oxides, NOx) sowie Feinstaub (engl.: Particulate Matter, PM < 10 µm und < 2,5 µm) als Einzelschadstoffe analysiert. Dieser Ansatz wurde aufgrund der Diskussionen im Zusammenhang mit der lokalen Luftqualität in den Städten, in denen die Schiffe anlegten, gewählt.

Abbildung 10 zeigt den Beitrag der Teilkomponenten zu den verschiedenen Wirkungskategorien, die in der Ökobilanz berücksichtigt wurden. Die Batteriemodule haben in allen betrachteten Wirkungskategorien den höchsten Anteil. Dies war angesichts der komplexen Zusammensetzung der enthaltenen Zellen und anderer Komponenten wie dem Batteriemanagementsystem (BMS) zu erwarten. Besonders bemerkenswert ist der hohe Anteil der Umrichter des Batteriespeichersystems, die in fast allen Wirkungskategorien eine ähnliche Größenordnung wie die 80 Batteriepacks mit insgesamt 1.760 Batteriemodulen aufweisen.

Neben dem hohen Beitrag der Frequenzumrichter haben die Kabel in allen Wirkungskategorien einen bedeutenden Anteil, außer im Bereich des globalen Treibhauspotenzials (GWP100). Die Umweltauswirkungen der Kabel lassen sich größtenteils auf das enthaltene Kupfer zurückführen.

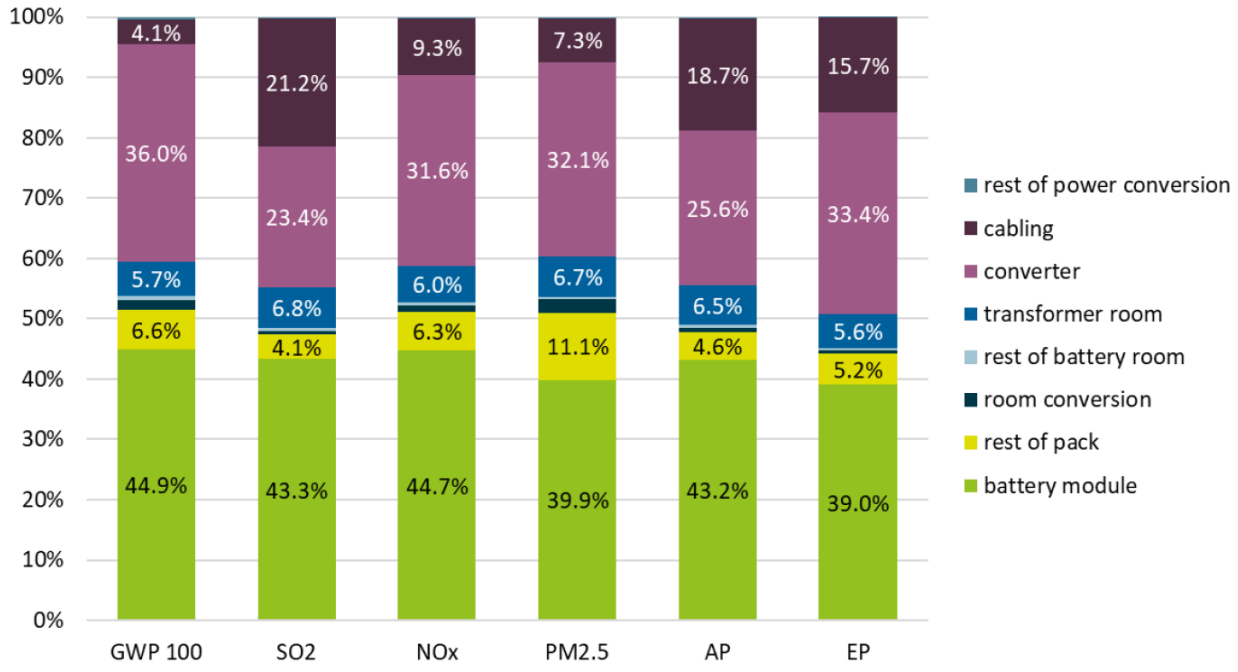


Abbildung 10: BESS - relative LCIA-Ergebnisse (funktionale Einheit: 2 Batterieräume und die gesamte Energieumwandlungseinheit)

Die operativen Vorteile wurden durch den Vergleich des Schiffsbetriebs mit und ohne BESS quantifiziert. Als Referenzjahr wurde das Jahr 2023 gewählt und drei verschiedenen Szenarien untersucht.

1. **Szenario 1: Baseline**
- Kraftstoffverbrauch ohne BESS und minimaler Stromverbrauch durch Landstrom.
- Primäre Daten werden zum Kraftstoffverbrauch verwendet.
2. **Szenario 2: Landanschluss/ -strom**
- Der Kraftstoffverbrauch wird durch erhöhten Landstromverbrauch verringert.
- Landstromversorgung in Häfen mit vorhandener Infrastruktur (z.B. Hamburg, Southampton) sowie in Häfen mit geplanter Infrastruktur (z.B. Le Havre, norwegische Häfen).
- Der Stromverbrauch wird basierend auf der Verfügbarkeit von Landstrom in verschiedenen Häfen und dem theoretischen Stromverbrauch auf Grundlage empirischer Werte berücksichtigt.
3. **Szenario 3: Landanschluss/ -strom + BESS**
- Neben dem "Landanschluss/-strom" werden Effizienzsteigerungen während des BESS-Betriebs und die direkte Energiespeicherung des Landstroms im BESS berücksichtigt.

- Im BESS-Szenario basieren die Kraftstoffeinsparungen durch Effizienzgewinne auf Simulationsergebnissen.

Zunächst wurden die Vorteile der aktuellen Nutzung von Landstrom quantifiziert, was einen wichtigen Schritt zur Elektrifizierung des Energieverbrauchs des Schiffes darstellt (Szenario "Landanschluss/ -strom"). Anschließend erfolgte die Quantifizierung des zusätzlichen betrieblichen Nutzens des BESS durch den Vergleich des Schiffsbetriebs mit und ohne BESS (Szenario " Landanschluss/ -strom + BESS“). Diese Vorteile umfassen Effizienzsteigerungen und die Möglichkeit, Landstrom zu speichern, müssen jedoch mit den negativen Auswirkungen, die sich aus der Produktion des BESS ergeben verglichen werden. Die Ergebnisse beider Maßnahmen zeigen deutlich positive Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz. Insbesondere führt die aktuelle Nutzung von Landstrom - selbst ohne BESS - bereits zu einer signifikanten Reduzierung der Emissionen da fossile Brennstoffe durch Strom aus dem Netz in den Anlaufhäfen ersetzt werden. Diese Vorteile sind stark von der Verfügbarkeit von Landstrom und die jeweilige Struktur des Strommix abhängig.

Die zusätzliche Reduktion durch das BESS ergab sich aus einer gesteigerten Betriebseffizienz und der erweiterten Nutzung von Landstrom, ermöglicht durch die Speicherung. Diese Verbesserung führte zu einer Gesamtreduktion der Treibhausgasemissionen aus Kraftstoff- und Stromverbrauch. Selbst unter Berücksichtigung der zusätzlichen Auswirkungen der Batterieproduktion blieb ein klarer Vorteil bestehen.

Obwohl die Interpretation der Ergebnisse für andere Emissionen wie NOx und SOx und deren Auswirkungen mit Vorsicht zu betrachten sind, deuten sie darauf hin, dass der Einsatz des BESS größtenteils keine nachteiligen Auswirkungen und teilweise sogar zusätzliche Vorteile mit sich bringt.

Zwei Hauptfaktoren können bis zum Jahr 2030 wesentlich zur Verbesserung der Bilanz eines BESS an Bord eines Kreuzfahrtschiffs beitragen:

1. Die Landstromversorgung kann ausgebaut und die Stromerzeugung weiter dekarbonisiert werden. Dies würde den Nutzen für Kreuzfahrtschiffe, die bereits über ein BESS verfügen und bis 2030 in Betrieb bleiben, potenziell erhöhen.
2. Es ist zu erwarten, dass die Umweltauswirkungen, die mit der Produktion von Batterien verbunden sind, aufgrund von Verbesserungen bei der Energiedichte und der Zellherstellung abnehmen werden.

Die Analyse dieser potenziellen Vorteile für das Jahr 2030 wurde in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurden die Auswirkungen einer erhöhten Verfügbarkeit von Landstrom und einem größeren Anteil erneuerbarer Energien am Strommix auf eine bereits in Betrieb befindliche Batterieinstallation auf einem Kreuzfahrtschiff untersucht, das voraussichtlich bis 2030 in Betrieb bleiben wird. Anschließend wurde zusätzlich eine verbesserte Batterieproduktion betrachtet, die eine potenzielle Situation im Jahr 2030 widerspiegelt und sich auf zukünftige Installationen bezieht. Die Bewertung des potenziellen Nutzens für das Jahr 2030 konzentrierte sich auf das GWP da für diese Zeit keine zuverlässigen Daten zur Quantifizierung weiterer Auswirkungen verfügbar waren.

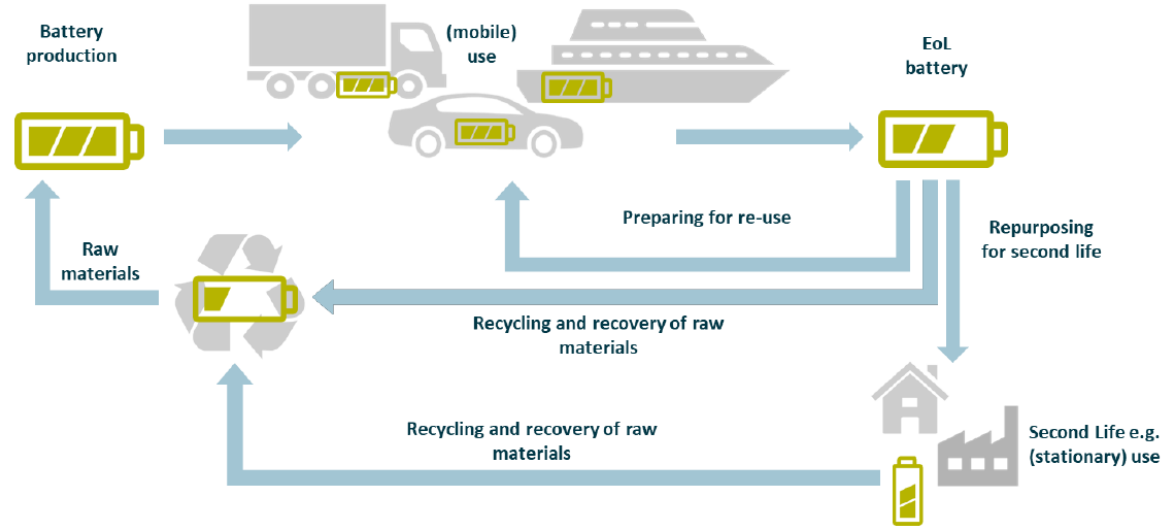
Neben den betrieblichen Verbesserungen im Jahr 2030 kann für zukünftige Installationen eine verbesserte Batterieherstellung angenommen werden, wenn die Zellen nach 10 Jahren Betrieb ausgetauscht werden müssen. Als mögliche Verbesserungen in der Batterieherstellung bis 2030 wurden die folgenden Aspekte für eine Quantifizierung berücksichtigt: Änderungen in der Zellchemie, erhöhte Energiedichte auf Zellebene und ein angepasster Energiemix für Zellproduktion. Diese Anpassungen führen zu erheblichen

Treibhausgaseinsparungen. Tabelle 3 vergleicht das GWP für die Produktion heute und im Jahr 2030. Das GWP der Batteriezellen wird durch die angenommenen Optimierungen mehr als halbiert. Entsprechend dem verbleibenden Massenanteil der Batteriezellen nehmen die relativen Einsparungen auf den übergeordneten Ebenen der Batteriemodule, -packs und -räume ab. Auf der BESS-Ebene, die die Leistungsumwandlung einschließt, beträgt der Nutzen 13 %.

Tabelle 3: GWP 100 [kg CO2eq] und Nutzen in 2030 – absolute Werte auf BESS-Ebene (zwei Batterieräume und Power Conversion)

Scenario	battery cells	battery modules	battery packs	battery rooms	BESS
Current production	830,911	1,595,953	1,831,620	1,914,795	3,554,708
Production in 2030	385,613	1,148,728	1,384,290	1,467,466	3,107,378
Benefit in 2030	-54%	-28%	-24%	-23%	-13%

Je nach Anwendung wird eine Batterie zu einem bestimmten Zeitpunkt als unzureichend für mobile Anwendungen eingestuft, hat aber dennoch eine potenzielle Verwendung für andere Anwendungen, insbesondere im stationären Sektor. Dies bedeutet, dass die Batterie nach ihrer ersten Lebensdauer immer noch einen beträchtlichen Marktwert hat, der jedoch stark variieren kann. Da die Preise für neue Lithium-Ionen-Batterien in den letzten Jahren erheblich gesunken sind, hat sich die Preisspanne für gebrauchte Batterien verringert. Das Batteriespeichersystem auf der AIDAprima hat dagegen den Vorteil, dass es ein großes homogenes System ist, das mehr Möglichkeiten auf dem Markt eröffnet. In Abbildung 11 werden verschiedene EOL-Optionen für genutzte Batteriespeichersysteme beschrieben.



Source: ifeu 2024.

Abbildung 11: End-of-Life-Optionen für das BESS

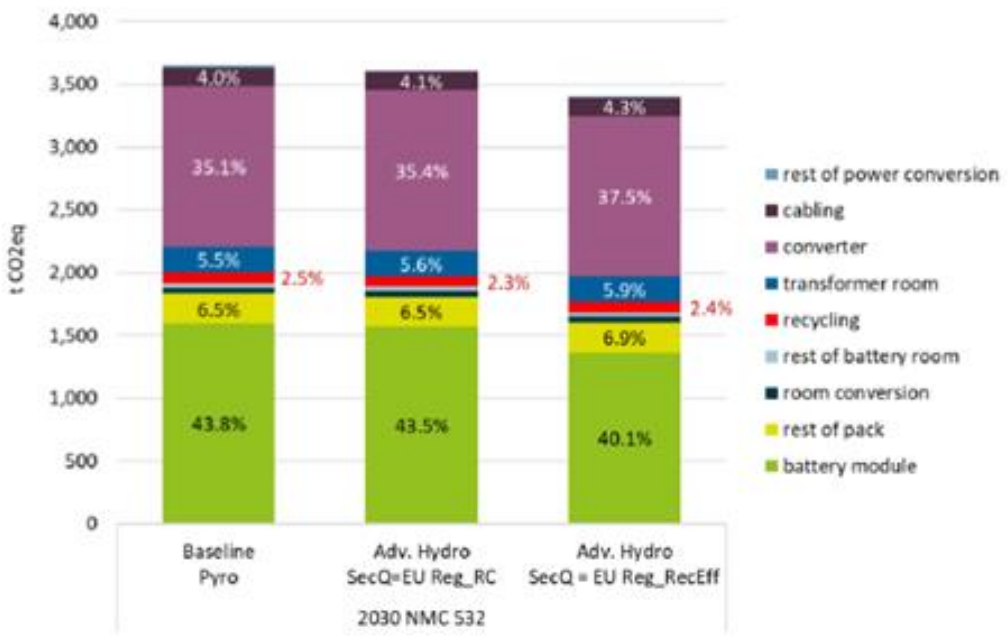
- **Re-use:** Vollständige oder Teilnutzung für ihre ursprüngliche Anwendung nach einer technischen Überholung.
- **Second-life use**: Aufarbeutung und Wiederverwendung der Batterien oder Teilen davon für eine andere Anwendung (RECHARGE 2014).
- **Recycling:** Recycling und Materialrückgewinnung beginnen, wenn das BESS aus wirtschaftlichen oder sicherheitstechnischen Gründen nicht mehr genutzt werden kann.

Im Fall des Batteriespeichersystems (BESS) der AIDAprima spielen Recyclingmethoden eine entscheidende Rolle. Zwei Hauptansätze wurden untersucht: pyrometallurgisches Recycling und fortschrittliche hydrometallurgische Verfahren. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

Effizienzsteigerung durch fortschrittliche Verfahren: Das fortschrittliche hydrometallurgische Recyclingverfahren zeigt eine höhere Effizienz im Vergleich zum pyrometallurgischen Ansatz. Es ermöglicht die Rückgewinnung praktisch aller Materialien aus den Batteriezellen.

Reduzierung der Umweltauswirkungen: Beide Recyclingverfahren führen zu einer geringfügigen Erhöhung der Gesamtemissionen des BESS. Dennoch sind diese Erhöhungen im Vergleich zu den Gesamtemissionen des BESS relativ gering, wobei nur etwa 2,5 % der Gesamtemissionen auf den Recyclingprozess entfallen.

Potenzial zur Emissionsreduzierung: Das Szenario des fortschrittlichen hydrometallurgischen Recyclings für das Jahr 2030 weist ein Reduktionspotenzial von 7 % auf BESS-Ebene und 28 % auf Zellebene auf. Dies unterstreicht die Bedeutung der Förderung von Sekundärmaterialien im System zusätzlich zum Recyclingprozess selbst. Abbildung 12 zeigt die GWP-Ergebnisse für die verschiedenen Zellrecyclingszenarien.



Pyro: Pyrometallurgical recycling; Adv. Hydro: Advanced hydrometallurgical recycling; SecQ = Secondary quota for materials; EU Reg. = EU Battery Regulation; RC= Recycled content; RecEff = Recycling Efficiency.

Abbildung 12: GWP des BESS (10 MWh) einschließlich verschiedener Szenarien für das Recycling der Zellen

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Übergang zu fortschrittlichen Recyclingverfahren, insbesondere hydrometallurgischen Verfahren, einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Umweltauswirkungen von Batterie-Energiespeichern leisten kann.

Die Vorteile des Batteriespeichersystems hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasemissionen sind somit belegt. Obwohl die relativen Einsparungen im Verhältnis gering ausfallen, sind die absoluten jährlichen Reduktionen dennoch beträchtlich. Trotzdem sollte das BESS primär als Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz angesehen werden; die zusätzliche Speicherung von Landstrom stellt lediglich einen kleinen Schritt in Richtung einer umfassenderen Elektrifizierung dar. Eine Ausweitung und Dekarbonisierung der Landstromnutzung im Allgemeinen scheint jedoch kurzfristig eine sinnvolle Strategie zu sein und kann durch das BESS weiter optimiert werden. Für eine „Green Cruising Strategy“, die eine vollständige Dekarbonisierung des Kreuzfahrtbetriebs anstrebt, sind allerdings über die Nutzung von Landstrom und Effizienzverbesserungen hinaus zusätzliche Maßnahmen und alternative Strategien erforderlich.

Die wesentlichen Ergebnisse des DDD-BATMAN Verbunds sollen im folgenden Kapitel reflektiert werden.

4 Übersicht der wesentlichen Arbeitsergebnisse

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf verschiedene Schwerpunkte. Zunächst erfolgte die Identifikation relevanter Datenströme, um den Datenanalyseteil des Projekts zu unterstützen. Hierbei wurden operative Daten bereitgestellt, um eine fundierte Analyse zu ermöglichen. Parallel dazu wurden Labortests an Batteriezellen durchgeführt, um wichtige Daten zu den Alterungs- und Degradationsmechanismen zu generieren.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung und Analyse datengesteuerter Modelle. Diese dienten dazu, den Zustand der Zellen zuverlässig zu bestimmen, insbesondere den sogenannten State of Health (SOH) sowie die aktuell verfügbare Energie. Durch die Nutzung operativer Betriebsdaten konnte eine präzise Beurteilung erfolgen. Es wurden verschiedene Aspekte in Bezug auf die Integration großer Batteriesysteme auf Kreuzfahrtschiffen untersucht. Hierbei standen insbesondere Fragen der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Umweltverträglichkeit im Fokus. Des Weiteren wurden Vorarbeiten für zukünftige Regeln und Standards im Zusammenhang mit maritimen Batteriesystemen und Schiffsklassifizierung geleistet.

Die wichtigsten F&E-Aufgaben, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durchführung von Batteriezelltests im Labor
- Entwicklung verbesserte Methoden zur Erfassung und Übertragung von Betriebsdaten von in Betrieb befindlichen Schiffen
- Datenanalyse und Entwicklung von datengestützten Modellen
- Analyse der Degradation und Zellalterung basierend auf den Testergebnissen
- Untersuchung verschiedener Aspekte im Zusammenhang mit der Integration eines Batteriesystems auf Kreuzfahrtschiffen
- Nutzung datengestützter Ansätze und Sensordaten in der Schiffsklassifizierung
- Überlegungen zur Nutzung datengesteuerter Ansätze und Sensordaten in der Schiffsklassifizierung

Im Folgenden werden die Hauptergebnisse des Projekts präsentiert, die den verschiedenen Projektzielen entsprechen.

4.1 Batteriezelltest

Im Rahmen des Projekts wurden Batteriezyklustests in den Laboren des Fraunhofer ISE durchgeführt. Diese Tests erstreckten sich über einen längeren Zeitraum und wurden an drei verschiedenen Batteriezellen durchgeführt. Zwei zylindrischen 18650-Zellen nachfolgend bezeichnet als DDP; nominal Kapazität 2.5 Ah und DDE; Kapazität 3.5 Ah sowie Pouchzellen DDF; nominal Kapazität 64 Ah. Dabei wurden die Zellen kontinuierlich gemäß einer spezifizierten Testmatrix zyklisch belastet und regelmäßig auf ihre Kapazität hin überprüft. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die betrachteten Zellen im Projekt.

Tabelle 4: Betrachtete Batteriezellen im Projekt

Internal name	DDP	DDE	DDF
Cell format	Cyl. 18650	Cyl. 18650	Pouch bag
Capacity	2.5 Ah	3.5 Ah	64 Ah
Picture			

Die Ergebnisse dieser Tests lieferten wertvolle Datensätze mit umfassenden Degradationsdaten für die spezifischen Batteriezellen, einschließlich Zeitreihen von Zelltemperatur, Spannung und Strom. Abbildung 13 zeigt die Degradation der Batteriekapazität als Funktion der äquivalenten Vollzyklen. Einige der Zyklustests werden auch nach Abschluss des Projekts fortgesetzt, um zusätzliche Erkenntnisse über den Alterungszustand der Zellen bis zum Ende ihrer Lebensdauer zu gewinnen.

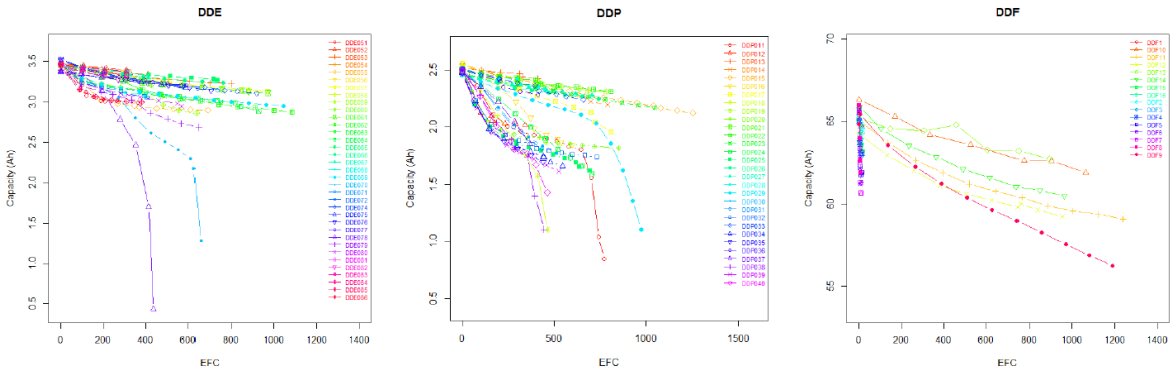


Abbildung 13: Kapazität in Abhängigkeit von den äquivalenten Vollzyklen (engl.: Equivalent Full Cycles, EFC); DDE-Zellen (links), DDP-Zellen (Mitte) und DDF-Zellen (rechts)

Zusätzlich zu den primären Daten haben die Überprüfungen und umfassenden Untersuchungen der getesteten Zellen neue Erkenntnisse über die allgemeinen Mechanismen der Zelldegradation geliefert. Die Daten wurden bei der Entwicklung datengesteuerter Methoden zur Abschätzung des Batteriezustands in den nachfolgenden Arbeitspaketen des Projekts genutzt. Über Projektergebnisse aus dieser Arbeit wird in [1, 2, 3, 4, 5] berichtet.

4.2 Erfassung und Übertragung von Betriebsdaten

Im Zuge der Projektarbeit wurden Strategien zur Datenerfassung und -bereitstellung entwickelt. Dabei wurden Daten von insgesamt 6 Schiffen mit Batteriesystemen erfasst und mit den Projektpartnern geteilt. Die erfassten Rohdaten der Batteriezellen umfassen Zellspannung, -temperatur sowie Strom und Spannung. Darüber hinaus wurden Zeitreihen des Ladezustands vom Batteriemanagementsystem (BMS) erfasst. Außerdem wurden Testergebnisse von jährlichen Kapazitätstests gesammelt, wobei mindestens zwei solcher Tests für jedes Schiff durchgeführt wurden. Diese Daten wurden in nachfolgenden Arbeitspaketen des Projekts verwendet, die sich auf datengesteuerte Modelle zur Überwachung des SOH konzentrierten. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei diesen Daten um sensible Informationen handelt, die Corvus und seinen Kunden gehören und außerhalb des Konsortiums nicht öffentlich zugänglich gemacht werden können. Über Projektergebnisse zur Sammlung und gemeinsamen Nutzung von Betriebsdaten wurde in [6, 7, 8] berichtet.

4.3 Entwicklung von datengestützten Modellen

Zur Schätzung des Alterungszustands aus Zeitreihendaten wurden im Projekt verschiedene Methoden untersucht. Zu Beginn wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Technik zu erfassen. Diese Recherche ergab, dass es viele unterschiedliche Ansätze zur datengesteuerten Überwachung der verfügbaren Zellkapazität gibt und dass die Festlegung zuverlässiger und effektiver Ansätze eine Herausforderung darstellt. Daher wurden im Projekt verschiedene Ansätze erforscht, darunter Deep Learning aus dem Bereich des maschinellen Lernens, iterative Schätzungsmethoden (Erweiterungen des Kalman-Filters), Schnappschuss-Methoden, Ersatzschaltbildannäherung und andere mathematische Methoden Jeder dieser Ansätze birgt sowohl Vor- als auch Nachteile. Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Arbeit ist, dass Daten allein möglicherweise nicht ausreichen sind, um hinreichend genaue und zuverlässige Vorhersagen des SOH zu gewährleisten. Daher wurden hybride Ansätze untersucht, die Daten mit physischen Erkenntnissen und Modellen kombinieren. Insbesondere ein Ansatz, der Sensordaten mit dem Prinzip der Coulomb-Zählung und einer Ersatzschaltbildannäherung zusammen mit umfangreichen Charakterisierungstests und Look-up-Tabellen kombiniert, wurde als der bevorzugte Ansatz ermittelt. Es wird vorgeschlagen, dass ein solcher Ansatz für die unabhängige Überprüfung des SOH zu Klassifizierungszwecken verwendet werden kann, ohne dass ein bestimmtes Prüfverfahren oder eine physische Kapazitätsprüfung erforderlich ist. Dennoch sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um den Ansatz für verschiedene Arten von Batteriesystemen vollständig zu verifizieren und zu validieren.

4.4 Hybridisierung von Schiffsantrieben

In diesem Projekt wurden Strategien zur Bewertung und Verbesserung des potenziellen Einsatzes von Batteriesystemen an Bord von Kreuzfahrtschiffen unter realen Bedingungen untersucht. Das Ziel war es, die Lebensdauer der Batterien zu maximieren, um sowohl Umweltauswirkungen als auch die wirtschaftlichen Kosten für den Austausch der Batteriezellen am Ende ihrer Lebensdauer (EOL) zu minimieren. Zunächst wurde ein realistisches Betriebsprofil entwickelt, das auf Messungen an Bord des Kreuzfahrtschiffs AIDAprima basierte. Dieses Profil lieferte wichtige Einblicke, um den Schiffsbetrieb zu optimieren. In der nächsten Phase wurden umfassende Energiemodelle entwickelt, detailliert im Projektbericht D4.1 [9], um Möglichkeiten und Einschränkungen für die operative Unterstützung und Optimierung zu identifizieren.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung eines strategischen Ansatzes zur Verlängerung der Lebensdauer, hier der spezifischen Nachrüstung mit einem Batteriespeichersystems auf der AIDAprima, das

auf das Betriebsprofil des Kreuzfahrtschiffs abgestimmt ist. Diese Strategie basiert auf einer Multiparameter-Optimierung, die die mit der Lebensdauer verbundenen Kosten für den Zellaustausch, Energieeinsparungen und die Verringerung des ökologischen Fußabdrucks berücksichtigt. Ein wichtiger Bestandteil dieser Strategie war die Formulierung eines klaren Betriebsprofil. In diesem Kontext lag der Fokus auf der Nutzung des Batteriesystems zur Reduzierung von Spitzenlasten, als Spinning-Reserve, zur Optimierung des Treibstoffverbrauchs und damit verbundener Emissionsreduktion sowie für den Betrieb des Schiffes im emissionsfreien Modus für begrenzte Zeiträume in umweltsensiblen Gebieten Im Projektbericht [10] wurden die Ergebnisse detailliert beschrieben. Um die kontinuierliche Optimierung der Batterienutzung sicherzustellen, ist eine fortlaufende Überwachung und Weiterentwicklung von entscheidender Bedeutung, um das Verständnis der Vorteile eines batteriegestützten Schiffsbetriebs zu vertiefen.

Weiterhin wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt, um die Umweltauswirkungen des 10 MWh-Batteriespeichersystems auf der AIDAprima vor und nach der Installation zu vergleichen. Die Ökobilanz folgte einem systematischen Ansatz und bewertete die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus der Batterie, einschließlich Rohstoffgewinnung, Materialverarbeitung, Herstellung, Vertrieb, Nutzung, Reparatur, Wartung und Entsorgung oder Recycling. Die Bewertung quantifizierte die Emissionseinsparungen durch Simulationen und verschiedene Modelle, worauf bereits in Kapitel 3.3.4.3 Objektive Analyse des umwelttechnischen Nutzens der Installation, näher eingegangen wurde. Zusätzlich wurden mögliche Szenarien hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit von Landstromanschlüssen und der Recyclingfähigkeit in die Bewertung integriert, wie im Projektbericht [11] beschrieben.

4.5 Nutzung datengesteuerter Ansätze und Sensordaten in der Schiffsklassifizierung

Im weiteren Verlauf des Verbundvorhabens wurde die Anwendung datengesteuerter Methoden auf Basis von Sensordaten im Kontext der Schiffsklassifizierung untersucht. Dabei wurde ein Ansatz identifiziert, der potenziell gleichwertig zu den jährlichen Kapazitätstests ist, sofern bestimmte Anforderungen erfüllt sind. Dokumentiert im Projektbericht [12] beschrieben. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen für die Klassifikationsgesellschaften ableiten.

5 Reflektion der Zielerreichung und des Verwertungsplans

Die Projektergebnisse wurden sowohl innerhalb der Organisationen der Projektpartner als auch extern verbreitet. Die Projektberichte wurden intern als technische Berichte von den verschiedenen Partnern herausgegeben. Zusätzlich hat der DDD BATMAN Verbund zwei Seminare über maritime Batterien abgehalten. Das erste Seminar fand während der Watts Up 2023 Konferenz in Rotterdam statt, an der 170 Teilnehmer mit Interesse an maritimem Batterietechnologien teilnahmen.[2] Das zweite Seminar wurde sowohl am Hauptsitz vom DNV in Høvik, Norwegen als auch online durchgeführt und zählte etwa 100 Teilnehmer aus den Partnerorganisationen und externen Unternehmen. Teile der Projektergebnisse wurden im Tagungsband Statustagung „Maritime Technologien“ 2023 veröffentlicht.[3] Carnival Maritime ist außerdem stark in der Arbeit der European Maritime Safety Agency (EMSA) zur Vereinheitlichung der Sicherheitsanforderungen für Batterien an Bord von Schiffen, involviert und unterstützt mit den gewonnenen Erkenntnissen aus dem vorliegenden Projekt.

[2] https://www.maritimebatteryforum.com/news/watts-up-2023-recap
[3] https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/5304/live/lw_file/tb_st2023.pdf

Auf Seiten des DNV hat das Projekt zu einem besseren Verständnis der Degradation von Batterien und der Nutzung datengesteuerter Methoden zur unabhängigen Überprüfung des Gesundheitszustands im Rahmen der Schiffsklassifizierung geführt. Der DNV ist daher in der Lage, eine solche Verifizierung auf der Grundlage normaler Betriebsdaten zu akzeptieren, ohne spezielle physische Tests zu verlangen.

Corvus Energy hat verbesserte Methoden für die Erfassung und den Austausch von Batteriedaten von in Betrieb befindlichen Schiffen sowie eine verbesserte Datenanalyse zur Überwachung des Batteriezustands entwickelt. Die Projektergebnisse haben somit zur Verbesserung der von der Klasse geforderten unabhängigen Überprüfung des SOH beigetragen und es Corvus ermöglicht, seinen Kunden verbesserte Dienstleistungen anzubieten, die die Klassenanforderungen ohne störende Kapazitätstests erfüllen.

Für das Fraunhofer ISE hat das Projekt zu einem verbesserten Verständnis der Degradationsmechanismen von Batterien geführt, das für seine Forschungs- und Beratungsdienstleistungen genutzt werden kann. Insbesondere hat das Fraunhofer ISE seine Kompetenz in der maritimen Anwendung von Batterien erweitert.

Seitens Carnival Maritime konnten durch den Einsatz von Hardware-in-the-Loop (HIL) Testing Fehler im Vorfeld der Installation detektiert und Störungen bei der Verbindung des Systems mit der Schiffsautomation im Realbetrieb vermieden werden. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sind wertvolle Erfahrungen, um weitere mögliche Installationen von Batteriesystemen in der Flotte vorzubereiten. Durch die Anwendung des HIL-Verfahrens kann das Power Management System (PMS) der Schiffe erprobt und weiterentwickelt werden. Durch die Erprobung der HIL-Methode lässt sich eine standardisierte Herangehensweise bei der Installation von Batteriesystemen entwickeln und ebnet den Weg für zukünftige Anwendungen innerhalb und außerhalb der Carnival Flotte. Des Weiteren ermöglichte eine detaillierte Schiffssimulation präzise Vorhersagen des Energiebedarfs, wodurch Fahrprofile und der optimale Umschaltzeitpunkt auf einen emissionsfreien Betrieb abgestimmt werden konnte, ohne dabei die Sicherheit des Schiffes zu gefährden. Die durchgeführte Lebenszyklusanalyse (LCA) quantifizierte zuverlässig den umwelttechnischen Nutzen der Installationen, einschließlich der End-of-Life Analyse der Batteriezellen, und untermauert die ökologischen Vorteile der Technologie.

In Zusammenarbeit mit den Partnern DNV, Corvus Energy und dem Fraunhofer ISE wurden darüber hinaus bedeutende Fortschritte erzielt. Diese umfassen ein verbessertes Verständnis der Batteriedegradation und die Einführung datengesteuerter Überwachungsmethoden, die eine unabhängige Überprüfung des SOH ohne störende Kapazitätstests ermöglichen. Diese Erkenntnisse haben nicht nur die technologische Führungsposition von Carnival Maritime gestärkt, sondern auch die Grundlage für zukünftige Entwicklungen und eine breitere Marktakzeptanz geschaffen. Die daraus resultierende Marktexpansion wird voraussichtlich eine erhebliche Nachfrage nach den in diesem Zusammenhang entwickelten Werkzeugen erzeugen und die Markteinführung im maritimen Sektor weiter voranzutreiben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Schiffseigner stehen vor ähnlichen Herausforderungen, wenn es um die Hybridisierung der Antriebssysteme ihrer Schiffe geht. Dies gilt insbesondere in der Passagierschifffahrt, im Kontext der wachsenden Umweltdebatte, der internationalen Gesetzgebung (IMO Treibhausgasstrategie) und der sich verändernden Kundenerwartungen. Diese Herausforderungen betreffen sowohl die bestehende Flotte als auch die Neubauprogramme der Reedereien. Mit der zu erwartenden Einführung von Brennstoffzellensystemen wird die Bedeutung von Batteriespeichern voraussichtlich noch weiter

zunehmen. Die Ergebnisse dieses Projekts tragen dazu bei, die Kosten von Batteriespeichersystemen für Schiffe zu senken und dadurch deren Akzeptanz in der maritimen Industrie zu fördern.

Der DNV hat Möglichkeiten zur Nutzung von Sensordaten aus dem operativen Schiffsbetrieb bei der Klassifizierung von Elektroschiffen und zur unabhängigen Überprüfung des Gesundheitszustands untersucht. Dies wird dazu beitragen, DNV zu einer attraktiveren Klassifikationsgesellschaft für vollelektrische und hybride Schiffe zu machen und vollelektrische Schiffe zu einer attraktiven Alternative für Schiffseigner, um emissionsfreie Alternativen in der Schifffahrt zu fördern. Der DNV hat Wissen über maritime Batteriesysteme gewonnen, das in zukünftigen Forschungsprojekten genutzt werden soll, um Lösungen für eine umweltfreundliche Schifffahrt zu entwickeln.

Die verbesserten Möglichkeiten zur Erfassung, Weitergabe und Analyse von Daten maritimer Batteriesysteme haben es Corvus Energy ermöglicht, seine Produkte und Dienstleistungen weiterzuentwickeln, insbesondere im Hinblick auf die von den Klassifikationsgesellschaften geforderte unabhängige Überprüfung der Batteriekapazität. Diese Erkenntnisse kommen auch ihren Kunden und anderen Interessengruppen zugute. Eine verbesserte Überwachung des SOH von Batteriesystemen an Bord kann zudem zur Sicherheit solcher Schiffe beitragen.

Die aus den Labortests des Fraunhofer ISE gewonnenen Daten werden öffentlich zugänglich gemacht, um Forschungen zu unterstützen, die sich mit der Überwachung der Batteriedegradation und verwandten Themen beschäftigen.

Carnival Maritime erforscht proaktiv ökologische und finanzielle Fortschritte für die von ihr betriebenen Kreuzfahrtschiffe und die gesamte Flotte der Carnival Corporation. Das anhaltende Engagement für Nachhaltigkeit, Innovation und Dekarbonisierung hat zur Bewertung von Batteriekonzepten in verschiedenen Schiffsklassen geführt. Umfassende Details zu finanziellen Überlegungen und dem SOH der Batterien während ihrer gesamten Lebensdauer sind für eine fundierte Entscheidungsfindung unerlässlich. Dies gilt sowohl für die Nachrüstung für die bereits im Betrieb befindlichen Schiffe als auch für die Integration von Batterien in Neubauprogramme. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Informationen, die erheblich zur Effizienz der Flotte beitragen, indem sie sowohl die ökologischen als auch die finanziellen Aspekte verbessern. Die Projektergebnisse tragen dazu bei, die Lebensdauer der Anlagen zu optimieren, Systemausfälle zu minimieren und die wirtschaftlichen Vorteile der Technologie zu maximieren und steigern somit die Motivation von Schiffseignern Batteriesysteme zu nutzen. Sie rechtfertigen und reduzieren nicht nur die Kosten von Batteriesystemen, sondern erleichtern auch deren Markteinführung im maritimen Sektor.

Referenzen

[1] Maximilian Bruch. D2.1: Report on design of experiment and scientific background, 2022. Fraunhofer ISE project report.

[2] Maximilian Bruch. D2.2: First set of extensive preliminary experimental test data, 2022. Fraunhofer ISE project report.

[3] Maximilian Bruch. D2.3: Synthetic test data set, 2022. Fraunhofer ISE project report.

[4] Maximilian Bruch. D5.1: Cross industry knowledge overview report, 2022. Fraunhofer ISE project report.

[5] Maximilian Bruch. D2.4: Updated synthetic and experimental test data, 2024. Fraunhofer ISE project report.

[6] Katrine Bruvik. First soh alogirhm to be shared, 2022. Corvus Energy report 1025644.

[7] Katrine Bruvik. Secure data transfer strategy report, 2022. Corvus Energy report 1025643.

[8] Rambabu Kandepu. Condition monitoring possibilities report, 2023. Corvus Energy report.

[9] Vanessa Grendze. D4.1: Operational data from cruise ship in operation, 2024. Carnival Maritime project report.

[10] Vanessa Grendze. D4.2: Report on replacement strategies and increasing battery lifetimes, 2024. Carnival Maritime project report.

[11] Vanessa Grendze. D4.3: Report on life-cycle assessment (LCA), 2024. Carnival Maritime project report.

[12] Øystein Åsheim Alnes. Input to dnv class approach towards data-driven SoH verification methods, 2023. DNV memo no. 10200667_WP6_6.1/2.