



# Machbarkeitsstudie zur Elektrifizierung des Fahrgastschiffes *MS Altefähr*

Im Auftrag von: Hochschule Stralsund  
Zur Schwedenschanze 15  
18435 Stralsund

Bearbeitet von: Ampereship GmbH  
An der Werft 17  
18439 Stralsund

Stralsund, den 10.08.2021



European  
Regional  
Development  
Fund

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis.....	4
1. Projektziel.....	5
2. Motivation.....	5
3. Analyse des IST-Zustandes / Erstellung eines Fahrprofils der MS Altefähr: Analyse von Fahrtrouten, Energieverbrauch & -Effizienz .....	6
3.1 Analyse von Fahrtrouten .....	6
3.2 Energieverbrauch & -Effizienz .....	6
4. Analyse des baulichen IST-Zustandes des Fahrgastschiffes.....	6
4.1 Beschreibung des Fahrgastschiffes.....	6
4.2 Beschreibung des Schiffsbetriebs.....	7
4.3 Beschreibung des bestehenden Antriebssystems .....	8
4.3.1 Gravimetrische Betrachtung .....	8
4.3.2 Volumetrische Betrachtung .....	9
4.3.4 Fahrprofil.....	11
5. Vorschläge für Umrüstung und Neubau.....	12
5.1 Vorstellung der Antriebsarten .....	13
5.1.1 Batterie.....	13
5.1.2 H <sub>2</sub> -Brennstoffzelle .....	15
5.1.3 Hybridantrieb (Brennstoffzelle als Reichweitenerweiterung).....	18
5.1.4 Photovoltaikanlage .....	18
5.1.5 Vergleich der Antriebssysteme in Bezug auf den bestehenden Dieselmotor ...	19
5.2 Vorschläge für eine Umrüstung.....	20
5.3 Vorschläge für einen Neubau .....	20
6. Analyse der erzielbaren Verbesserung nach einer Umrüstung.....	26
6.1 Bestandsystem (Diesel).....	26
6.2 Elektrisches System (Batterie).....	26
6.3 Hybridsystem (Wasserstoff).....	27
7. Analyse der notwendigen landseitigen Ladeinfrastrukturen .....	29
7.1 Kabel-basiert .....	29
7.2 Induktiv .....	29

7.3	Netzanschluss .....	29
7.4	Wasserstofftankstelle .....	30
8.	Vorschlag für das geeignetste Antriebssystem.....	30
9.	Abschätzung der landseitigen Investitionskosten f.d. Ladeinfrastruktur .....	31
10.	Zulassungsvoraussetzungen für Binnenschiffe .....	32
10.1	Zulassungsvoraussetzungen von batterieelektrischen Antriebssystemen .....	32
10.2	Zulassungsvoraussetzungen von Brennstoffzellen-Antriebssystemen.....	34
11	Vorschläge zum Betrieb der landseitigen Ladeinfrastruktur .....	36
11.1	Potenzielle Betreiber .....	36
11.2	Betreiberformen (kommunal & PPP-Modell) .....	37
12	Schlussfolgerung und Erkenntnisse für vergleichbare Projekte.....	37
12.1	Reichweiten, Wind- und Wetterverhältnisse.....	37
12.2	Schiffsgröße- und Typ / Kapazität.....	38
12.3	Landseitige Ladeinfrastrukturen und Anzahl der Abnehmer.....	38

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1 - Fahrgastschiff MS Altefähr.....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2 - Gewichtsverteilung relevanter Antriebskomponenten (rot) und Ballast (lila) sowie verfügbarer Raum (blau) .....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 3 - Fahrstrecken der MS Altefähr nach Fahrplan .....</i>	<i>12</i>

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 - Hauptparameter der MS Altefähr .....</i>	<i>7</i>
<i>Tabelle 2 - Fahrplan der MS Altefähr .....</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 3 – Abmessungen und Gewicht der Schiffsmotoren(Annahme) .....</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 4 - Gewichte der Komponenten des bestehenden Antriebssystems.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 5 - Zur Verfügung stehender Stauraum der bestehenden MS Altefähr .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 6 - Fahrprofil .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 7 - Vergleich der Kennwerte alternativer und konventioneller Energiesysteme .....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 8 - Ergebnisse der Auslegung alternativer Antriebssysteme - Neubau Stahl.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 9 - Ergebnisse der Auslegung alternativer Antriebssysteme - Neubau Aluminium ...</i>	<i>25</i>

## 1. Projektziel

Ziel der Machbarkeitsstudie ist es, ein emissionsfreies Antriebskonzept im Rahmen eines Umbaus bzw. Neubaus des Fahrgastschiffes *MS Altefähr* zu entwickeln, welches technisch ausgereift und wirtschaftlich nutzbar ist. Die Studie liefert zudem eine Übersicht über mögliche emissionsfreie Antriebskonzepte, so dass die technische und regulatorische Machbarkeit auf Schiffe anderer Leistungsklassen und Fahrprofile abgeleitet werden kann.

## 2. Motivation

Ganz im Sinne des Klimaschutz-Teilkonzepts „Klimafreundliche Mobilität – Stralsund steigt um“ soll nun zu KFZ-, Rad, und Fußgängerverkehr ebenfalls der öffentliche Schiffsverkehr in Betracht gezogen werden. Hierfür soll zunächst geprüft werden, inwieweit eine Umrüstung auf bzw. ein Neubau des Fahrgastschiffes *MS Altefähr* mit einem CO<sub>2</sub>-neutralen Antrieb umgesetzt werden kann. Die *MS Altefähr* sichert nicht nur den öffentlichen maritimen Personenverkehr zwischen der Hansestadt Stralsund und Altefähr, sondern trägt durch ihre Hafenrundfahrten und Sonderveranstaltungen ebenfalls maßgeblich zu Tourismus und kultureller Aktivität der Hansestadt bei.

Zukünftig wird es durch politische Maßnahmen strengere Schadstoffregulierungen in der Schifffahrt geben, welche teure Nachrüstmaßnahmen oder Emissionssteuern mit sich bringen werden. Durch die Implementierung emissionsfreier Antriebskonzepte können nicht nur die Abgasemissionen, sondern auch Lärm- und Vibrationsemissionen sowie der Wartungsaufwand des Schiffes reduziert werden. So wird ein verbessertes Fahrerlebnis für Passagiere und ein optimierter Fahrbetrieb für die Bordbesatzung erreicht.

### **3. Analyse des IST-Zustandes / Erstellung eines Fahrprofils der MS Altefähr: Analyse von Fahrtrouten, Energieverbrauch & -Effizienz**

#### **3.1 Analyse von Fahrtrouten**

Die Analyse der Fahrtrouten erfolgte anhand der von der Firma NautiTronix UG bereitgestellten Daten zum Fahrgastschiff MS Altefähr. Dabei wurden Datensätze im Zeitraum Juni bis Oktober 2020 mit einer Auflösung von 5s ausgewertet. Es konnte anhand der Daten eine mittlere Fahrzeit von 6 Stunden und 36 Minuten pro Tag ermittelt werden. Ein detaillierter Fahrplan ist unter 4.2 beschrieben.

#### **3.2 Energieverbrauch & -Effizienz**

Um den Energieverbrauch mit den ausgewerteten Datensätzen genauer bestimmen zu können, wurden die Tankdaten im entsprechenden Zeitraum in die Analyse mit einbezogen. Es konnte eine mittlere Tankmenge von 113 Liter Dieseldieselkraftstoff pro Tag bestimmt werden. Zusammen mit den aufgenommenen Datensätzen der MS Altefähr ergaben sich ein mittlerer täglicher Motorverbrauch von 89 Liter und ein AUX-Verbrauch von 24 Liter Dieseldieselkraftstoff. Somit ergibt sich ein mittlerer chemischer Energiebedarf von 1.106 kWh pro Tag. Diese Energiemenge ließ sich in 250 kWh/d für den Vortrieb des Schiffes, 100 kWh/d für Zusatzgeräte und 756 kWh/d als Wirkungsgradverluste unterteilen. Es ergibt sich damit eine mittlere Gesamtsystemeffizienz von 31,65%.

### **4. Analyse des baulichen IST-Zustandes des Fahrgastschiffes**

#### **4.1 Beschreibung des Fahrgastschiffes**

Die *MS Altefähr* ist ein Fahrgastschiff, das auf der WGB Werft in Berlin im Jahre 1995 gebaut wurde. Im Jahr 1996 nahm sie den Fährverkehr zwischen Stralsund und Altefähr auf Rügen auf. Sie wird von der Reederei Weiße Flotte betrieben, die ihren Sitz ebenfalls in Stralsund hat. Das dieseldieselbetriebene Motorschiff wurde im Jahr 2003 um 6 m verlängert und hat seitdem Platz, um 225 Fahrgäste aufzunehmen.



**Abbildung 1 - Fahrgastschiff MS Altefähr**

Die MS Altefähr besitzt folgende Hauptparameter.

**Tabelle 1 - Hauptparameter der MS Altefähr**

<b>Parameter</b>	<b>Größe</b>
Länge über alles:	27,35 m
Länge zwischen den Loten:	26,00 m
Breite über alles:	5,50 m
Breite auf Spanten:	5,35 m
Tiefgang:	1,20 m
Seitenhöhe:	2,10 m
Tragfähigkeit:	33 t
Verdrängung:	93,5 m <sup>3</sup>
Fahrtgebiet:	Zone 2, BinSchUO
Fahrgastzahlen:	100 Personen (Salon)
	108 Personen (Salondeck)
	17 Personen (Achterdeck)

## 4.2 Beschreibung des Schiffsbetriebs

Die Betriebszeiten des Fahrgastschiffes hängen von der jeweiligen Saison ab. In den Sommermonaten ist mit einer erhöhten Fahrgastzahl zu rechnen, da sowohl Stralsund, als auch Rügen beliebte Urlaubsziele sind. Im Frühjahr sowie im Herbst reduzieren sich die Fahrgastzahlen und somit auch die Zahl der Einzelfahrten des Schiffes. In den Wintermonaten ist das Fahrgastschiff bis auf einige Sonderfahrten außer Betrieb. Der Vorsaison-, Hauptsaison- und Nachsaisonfahrplan gilt zu folgenden Zeiten:

- Vorsaison: 12.04.-17.05.
- Hauptsaison: 18.05.-22.09.
- Nachsaison: 23.09.-02.11.

In Tabelle 2 ist der aktuelle Fahrplan der *MS Altefähr* dargestellt. Der Fährverkehr Stralsund – Altefähr besteht zwischen dem Hafen Stralsund und dem Hafen Altefähr. Die Hafentour ist eine tourismusorientierte Rundtour um den Dänholm.

**Tabelle 2 - Fahrplan der MS Altefähr**

Hafentour	<i>ab Stralsund</i>	10:15	12:15	14:15	16:15	18:15
	<i>an Stralsund</i>	11:15	13:15	15:15	17:15	19:15
Fährverkehr	<i>ab Stralsund</i>	08:45	11:15	13:15	15:15	17:30
	<i>ab Altefähr</i>	09:00	11:30	13:30	15:30	17:45
	<i>an Stralsund</i>	09:15	11:45	13:45	15:45	18:00

In Vor-, Haupt-, Nachsaison    In Hauptsaison    mittwochs u. samstags vom 29.06.-31.

Insgesamt legt die *MS Altefähr* eine Strecke von 65 km pro Tag in der Hauptsaison (75 km mit der zusätzlichen Hafentour) und eine Strecke von 50 km pro Tag in der Vor- bzw. Nachsaison zurück. Sie erreicht hierbei eine Servicegeschwindigkeit von 11 kn. Die Sonderfahrten können bei dieser Kalkulation nicht berücksichtigt werden.

### 4.3 Beschreibung des bestehenden Antriebssystems

Für die Auslegung eines elektrischen, emissionsfreien Antriebssystems, sind eine volumetrische und eine gravimetrische Bilanzierung nötig. Diese Bilanzierung dient als Entscheidungsgrundlage, inwieweit die Integration eines entsprechenden Antriebssystems umsetzbar ist. Das Gewicht des derzeitigen Antriebssystems inklusive der Treibstofftankkapazität ist hierbei entscheidend, da dieses Gewicht als Referenz für das neue Antriebssystem gilt. Das zur Verfügung stehende Bauvolumen bestimmt, ob und wo das neue Antriebssystem untergebracht werden kann.

#### 4.3.1 Gravimetrische Betrachtung

Das Antriebssystem der *MS Altefähr* besteht aus einem Hauptmotor, der über eine Welle einen Propeller antreibt und einem Generator für die Bordstromversorgung. Die Daten des bestehenden Antriebssystems stehen nicht zur Verfügung. Daher wurden folgende, in *Tabelle 3* dargelegte Annahmen getroffen.



**Tabelle 3 – Abmessungen und Gewicht der Schiffsmotoren(Annahme)**

<b>Art</b>	<b>Hersteller und Typ</b>	<b>Gewicht [kg]</b>	<b>Maße (LxBxH) [mm]</b>
Hauptmotor	FPTIIVECO: C13 825 E21	1380	1465 x 1107 x 1058
Generator	FPT/IVECO: EPM F32-30	700	1350 x 700 x 980

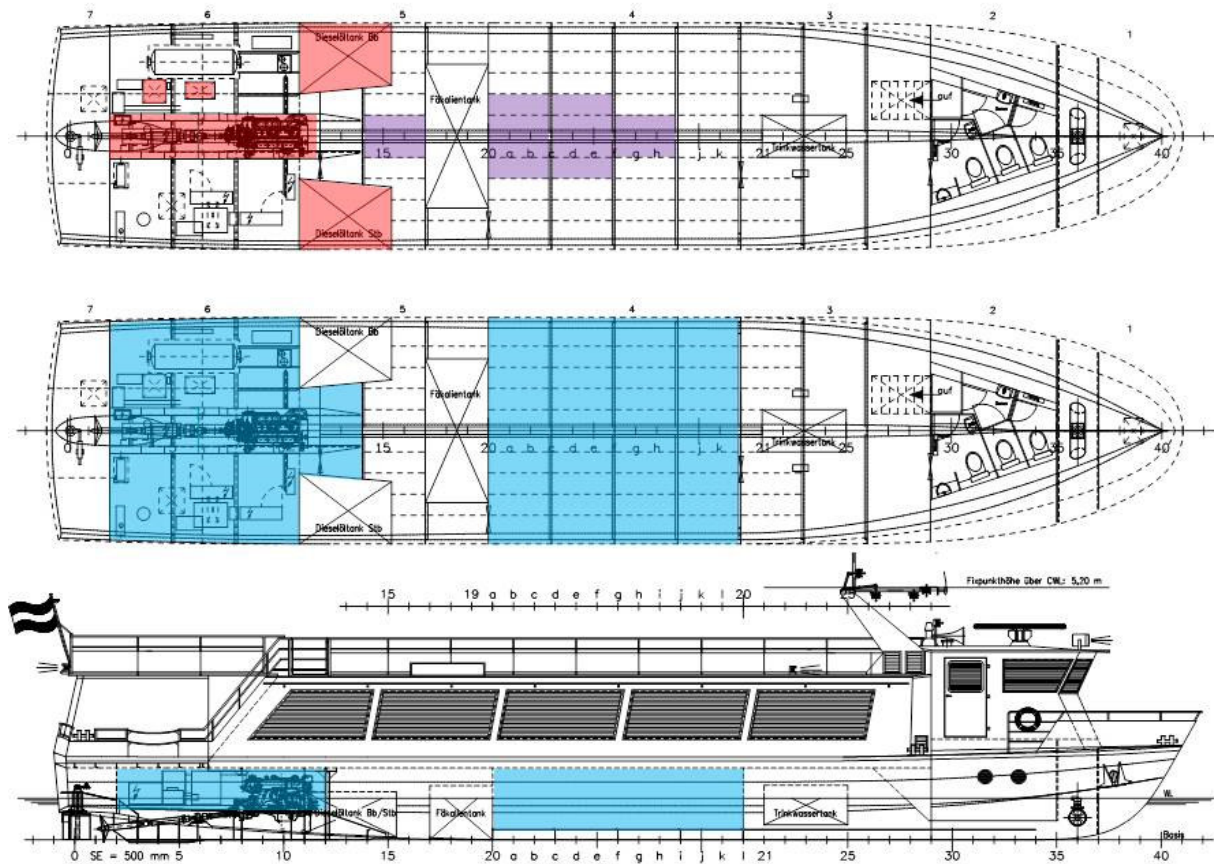
Für den Betrieb der beiden Motoren befinden sich auf dem Fahrgastschiff zwei Dieseltanks mit einer Treibstoffkapazität von 3500 Litern (vergleiche *Abbildung 2*). Im Zuge der Verlängerung des Schiffes wurde zusätzlicher Ballast in den Schiffsrumpf eingebracht, der eine zusätzliche variable Gewichtskomponente darstellt. Das Gewicht und die Verteilung des Ballasts wurden im Zuge örtlicher Begehungen ermittelt (vergleiche *Abbildung 2*). Zudem steht ein Krängungsversuch des verlängerten Schiffes zur Verfügung, welcher für die Gewichtsrechnung herangezogen wurde. Die für die Gewichtsbalanzierung zu berücksichtigen Komponenten und deren Gewichte können der *Tabelle 4* entnommen werden.

**Tabelle 4 - Gewichte der Komponenten des bestehenden Antriebssystems**

<b>Komponente</b>	<b>Gewicht [kg]</b>
Hauptmotor	1.380
Generator	700
Getriebe	150
Dieseltanks (voll betankt)	5.950
Öltanks, Wartungsmaterial	200
Ballast	5.710
<b>Gesamt</b>	<b>14 100</b>

#### **4.3.2 Volumetrische Betrachtung**

Für die volumetrische Betrachtung wurde der Generalplan der „MS Altefähr“ herangezogen. Der zur Verfügung stehende Raum ist in *Abbildung 2* dargestellt.



**Abbildung 2 - Gewichtsverteilung relevanter Antriebskomponenten (rot) und Ballast (lila) sowie verfügbarer Raum (blau)**

Der Schiffsrumpf unterhalb des Hauptdecks ist in 7 wasserdichte Abteilungen unterteilt. Für einen Umbau kommen die Abteilungen 4 und 6 in Frage. Abteilung 4 befindet sich zwischen Spant 20 und 20I und ist der Raum, welcher durch die Schiffsverlängerung im Jahr 2003 hinzukam. In der Abteilung 5, zwischen Spant 12 und 20, sind der Fäkalientank und die Dieseltanks untergebracht. Die Dieseltanks sind fest im Schiff integriert und fungieren im Falle eines Umbaus als Leerzellen. Im Falle eines Neubaus, stände der Platz, den die Dieseltanks einnehmen, zur Verfügung. Abteilung 6, zwischen Spant 2 und 12, ist der Maschinenraum. Dort sind der Generator für die Bordstromversorgung und der Hauptmotor mit dazugehörigem Getriebe und der Welle sowie Öltanks untergebracht. Im Falle einer Elektrifizierung werden die Motoren, das Getriebe und die Öltanks ausgebaut und bieten einem E-Motor genügend Platz.

Da der zur Verfügung stehende Platz durch eine Volumenangabe schwer interpretierbar ist, wird der zur Verfügung stehende Platz in eine Stellfläche und in die Höhe des Raumes unterteilt (vergleiche *Tabelle 5*).

**Tabelle 5 - Zur Verfügung stehender Stauraum der bestehenden MS Altefähr**

	<b>Stellfläche [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Raumhöhe [m]</b>
Abteilung 4	28,95	1,50
Abteilung 5	Für Umbau nicht relevant	
Abteilung 6	21,38	1,10

#### 4.3.4 Fahrprofil

Die Auslegung der jeweiligen Antriebssysteme richtet sich nach dem Fahrprofil der *MS Altefähr*, basierend auf dessen aktuellem Fahrplan. Das Fahrprofil (siehe *Abbildung 3* und *Tabelle 6*) basiert auf den gegebenen Geschwindigkeiten sowie der Strecke der Fährverbindung. Für die Hafentour liegen keine Informationen zur Betriebsgeschwindigkeit und Zwischenstopps vor. Aus diesem Grund wurde das Fahrprofil der Hafentour anhand der Strecke, der Fahrdauer und der daraus resultierenden mittleren Geschwindigkeit festgelegt. Für den Bordnetzverbrauch wurde eine konstante Last von 10 kW angenommen, ausgehend von dem Verbrauchswert vergleichbarer Schiffe. Diese Last liegt während der gesamten Betriebsdauer an. Anhand des Fahrprofils ist es möglich die Machbarkeit der potentiellen Antriebskonzepte festzustellen.

**Tabelle 6 - Fahrprofil**

	<b>Strecke</b>	<b>Geschwindigkeit</b>	<b>Fahrzeit</b>
Einheit	km	kn	min
Hafen Stralsund	0,6	5	3,89
Hafen Altefähr	0,3	5	1,94
Freifahrt Fährverkehr	1,5	11	4,42
Fahrt Hafentour	10,0	6	54,8



**Abbildung 3 - Fahrstrecken der MS Altefähr nach Fahrplan**

## 5. Vorschläge für Umrüstung und Neubau

Die Umrüstungsvorschläge und die Vorschläge für einen Neubau sollen unter der Betrachtung verschiedener Technologieanwendungen für elektrische Antriebssysteme erfolgen. Die folgenden Energiesysteme werden hierbei untersucht.

- Batterie
- H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle
- Hybrid aus Batterie und H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle

Antriebssysteme, die mit den genannten Energiesystemen betrieben werden, sind sogenannte Null-Emissions-Antriebe, da sie keine NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> oder Kohlenwasserstoffe emittieren. Zudem kann der elektrische Strom für die Batterie und für die Herstellung des Wasserstoffs für die Brennstoffzelle aus regenerativen Energiesystemen gewonnen werden. Der geeignetste Antrieb wird anhand folgender Kriterien ermittelt.

- 1) Technische Machbarkeit
- 2) Wirtschaftlichkeit

Die technische Machbarkeit betrachtet die Integration des Antriebssystems unter Berücksichtigung des Systemgewichts und -volumens, der Systemsicherheit sowie relevanter Vorschriften und Regularien. Die Wirtschaftlichkeit wird anhand der Investitions- und Betriebskosten sowie der Lebensdauer beurteilt.

## 5.1 Vorstellung der Antriebsarten

Um die Technologie hinter den Antriebssystemen besser verstehen zu können, werden die Energiesysteme Batterie, Wasserstoff-Brennstoffzelle und Hybridantrieb im Folgenden vorgestellt und erläutert.

### 5.1.1 Batterie

Batterien sind im Wesentlichen Akkumulatoren, die elektrische Energie chemisch speichern können. Durch ihren sehr hohen Wirkungsgrad von 90-95% haben sie kaum Speicher-, bzw. Umwandlungsverluste. In der Schifffahrt wurden schon zahlreiche Schiffe vollständig auf Basis von Batterien elektrifiziert.

#### Betrieb

Ein Batteriestack ist ein Zusammenschluss mehrerer Batteriemodule. Dieser Batteriestack hat eine definierte Leistung und Kapazität, die in Abhängigkeit voneinander skaliert werden kann. Hierdurch ist die Reichweite der Fähre begrenzt. Eine Erhöhung der Kapazität führt in der Regel zu einer Überdimensionierung der Batterieleistung und hat verhältnismäßig hohe Gewichts- und Stauraumvergrößerung zur Folge. Können Zwischenladungen während des Betriebs ermöglicht werden, kann die Batteriekapazität entsprechend reduziert werden. In diesem Fall müssen die notwendigen Standzeiten während des Fährbetriebs berücksichtigt werden. Der Fahrplan ist durch den Einsatz von Batterien weniger flexibel. Die Ladung der Batterien erfolgt in der Regel über einen hafenseitigen Landanschluss.

Batterietypen, die im maritimen Sektor Anwendung finden, sind vor allem Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren. Die Batterien besitzen ein Temperaturmanagementsystem, um die Temperatur in den Zellen zu überwachen. Darüber hinaus sind die Batterien mit einem Batteriemanagementsystem ausgerüstet, welches das System vor Überströmen schützt und den Ladezustand überwacht. Beide Systeme gewährleisten die Sicherheit, Leistungsfähigkeit

und Zyklenlebensdauer der Batterien. Um eine größtmögliche Zyklenlebensdauer des Systems zu erzielen wird die Gesamtkapazität der Batterie vorwiegend nur zu 70%- 80% DoD (Depth of Discharge) genutzt. Sowohl das Temperatur- als auch das Batteriemanagementsystem sind softwaretechnisch geregelt und benötigen kein Personal. Das Personal muss für den Umgang bei einem Ausfall oder Alarmmeldungen des BMS geschult sein.

### Wartung

Durch die begrenzte Zyklenfestigkeit muss die Batterie in der Regel nach ca. 10 Jahren ausgetauscht werden. Während des Betriebs müssen die Batterien per Sichtprüfung auf Kabelbrüche, Anschlüsse und äußere Beschädigung untersucht werden. Zudem ist zu beachten, dass der Batterieraum zu jedem Zeitpunkt trocken und sauber (Schmutzpartikel) gehalten werden muss. Darüber hinaus benötigt das Batteriesystem keine Wartung.

### Sicherheit

Sicherheitsrisiken sind mechanische Beanspruchungen und hohe Temperaturen, die zu einer Schädigung der Zellen führen können. Im schlimmsten Fall kommt es zu einem sogenannten thermal runaway, bei dem die Zellen innerhalb der Batterie unkontrolliert überhitzen. Aus diesem Grund sind eine feste und sichere Unterbringung der Batterien, sowie eine ausreichende Belüftung und Entrauchung des Batterieraums vorzusehen.

### Zulassung

Die Zulassung batterieelektrisch betriebener Schiffe erfolgt nach den Vorschriften und Richtlinien der BinSchUO und ES-TRIN und wird durch nationale Behörden oder eine Klassifikationsgesellschaft durchgeführt.

### Herstellung und Entsorgung/ Recycling

Lithium-Batterien bestehen aus Lithium, Kobalt und Nickel. Insbesondere Kobalt könnte zu einer knappen Ressource werden, wenn die Nachfrage an Lithium-Batterien steigt. Durch geeignete Recyclingverfahren ist ein Großteil der verwendeten Materialien wieder verwendbar. Nach dem Erreichen des EoL (End of Life) besitzen die Batterien, die im Mobilitätssektor (Schifffahrt, Kfz, ÖPNV) zum Einsatz kamen, oft noch 80% der Nennkapazität. Darüber hinaus können die Batterien jedoch noch zur Energiespeicherung, beispielsweise in Eigenheimen, verwendet werden. Die Nutzung der Second-Life-Batterie ist eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Möglichkeit, die Batterien länger zu nutzen.

### 5.1.2 H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle

Die Technologie zur Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen gilt heutzutage im Mobilitätssektor als ausgereift und in der Praxis erprobt. Bis heute existieren nur wenige brennstoffzellenbetriebene Schiffe, von denen die meisten im Rahmen von Forschungsprojekten gebaut worden sind. Bei der Technologie zur Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellen wird die Leistung des Antriebssystems mit der Größe der Brennstoffzelle dimensioniert und die Kapazität, also die Reichweite des Schiffs, durch die gespeicherte Wasserstoffmenge bestimmt. Zu einem H<sub>2</sub>-Brennstoffzellensystem gehören demnach die Brennstoffzelle inkl. der erforderlichen Hilfssysteme und die Wasserstofftanks. Dies bietet den Vorteil, dass wie bei einem konventionellen Antriebssystem mit Verbrennungsmotor, die Leistung und die Kapazität des Antriebssystems unabhängig voneinander skaliert werden können und der Fahrplan des Schiffes somit flexibler gestaltet werden kann.

#### Speicherung

Die sehr geringe volumetrische Energiedichte des Wasserstoffs stellt das größte Problem in der Wasserstoffspeichertechnologie dar. Um das Speichervolumen möglichst gering zu halten ist es notwendig den Wasserstoff entweder unter hohem Druck zu komprimieren oder mittels tiefen Temperaturen zu verflüssigen. In beiden Fällen wiegt das Tanksystem weit mehr als der in ihm gespeicherte Wasserstoff. Dies hemmt wiederum die Vorteile der sehr hohen gravimetrischen Energiedichte von molekularem Wasserstoff von 33,33 kWh/kg. Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff ist volumetrisch und gravimetrisch besser als eine Speicherung von komprimiertem Wasserstoff. Derzeitig existieren auf dem Markt noch keine frei verfügbaren LH-Tanks als Standardkomponente, welche kleinere Wasserstoffmengen speichern können, da der technische Aufwand zur Isolierung und somit Vermeidung des Boil-Off-Effekts verhältnismäßig hoch ist. (Boil-Off-Effekt: Durch den Wärmeeintrag aus der Umgebung in die Tanks verdampft der flüssige Wasserstoff, wodurch der interne Druck der Wasserstofftanks ansteigt. Um den Druck zu reduzieren öffnet sich ein Sicherheitsventil, welches einen Teil des Wasserstoffs ablässt. Hierdurch reduziert sich die gespeicherte Wasserstoffmenge und weniger Kapazität steht dem Tank zur Verfügung.) Die Firma Linde stellt auf Anfrage Prototypen und Sonderanfertigungen für die benötigte Wasserstoffmenge her und ist zudem technologisch im Stande, auch längere Stillstandszeiten ohne Wasserstoffverdampfung zu gewährleisten.

## Brennstoffzelle

Aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstands kommen ausschließlich NT-PEMFC (Niedertemperatur-Proton-Austausch-Membran Brennstoffzellen) für den Einsatz auf Schiffen der vorliegenden Größe und mit den entsprechenden Leistungsanforderungen in Frage. Ausschlaggebend ist hierfür die nachgewiesene, praxistaugliche mobile Einsatzfähigkeit, der hohe Wirkungsgrad von über 50%, die hohe Leistungsfähigkeit, die Verwendung von Luftsauerstoff anstelle von reinem Sauerstoff und das günstige Verhältnis aus Leistung und Bauvolumen bzw. Leergewicht des Stacks.

## Betrieb

Antriebssysteme auf Basis von Brennstoffzellensystemen werden üblicherweise zusammen mit Batterien als Pufferspeicher eingesetzt, da Brennstoffzellen verhältnismäßig lange Anlaufzeiten besitzen und deren Betrieb im unteren Leistungsbereich unwirtschaftlich ist. Für einen effizienten Betrieb und einer Erhöhung der Lebensdauer wird die Brennstoffzelle in einem Nennarbeitsbereich zwischen 30% und 70% MCR betrieben. Das Brennstoffzellensystem wird über ein Brennstoffzellenmanagementsystem gesteuert und überwacht. An dieses System sind ebenfalls alle sicherheitsrelevanten Sensoren angebunden.

Die Wasserstofftanks können sowohl betankt als auch ausgetauscht werden. In beiden Fällen muss von Seiten des Hafens gegebenenfalls die nötige Infrastruktur bereitgestellt werden. Die Betankungszeit von Wasserstoff ist zeitlich mit der konventionellen Betankung von Dieselmotoren zu vergleichen. Die Betankung kann sowohl über eine stationäre Tankstelle als auch über einen mobilen Wasserstofftrailer erfolgen. Die stationäre Tankstelle ist mit hohen Investitionskosten und einem erheblichen Platzaufwand verbunden. Bei der Betankung mittels mobilen Wasserstofftrailers muss die Lieferung des Wasserstoffes mit ausreichend Vorlauf terminiert werden. Bei einem Austausch der Wasserstofftanks sind Investitionen für mehrere Tanksätze zu tätigen. Zudem ist ein bordeigener oder landseitiger Kran erforderlich und die Wasserstofftanks müssen für einen schnellen Umschlag an Deck gelagert sein. Eine regionale Wasserstofftankstelle wird benötigt, um die leeren Wasserstofftanks wieder befüllen zu können.

## Wartung

Für die Wartung des Wasserstoffsystems wird eine jährliche Durchsicht empfohlen, welche den Austausch von Filtern, die Überprüfung der Wasserstoffleitungen und einen Systemtest umfasst. Die Wartung der CH-Tanks unterliegt der Druckbehälterrichtlinie. Die Wartung der LH-Tanks übernimmt der Hersteller.



## Sicherheit

Durch seine hohe Reaktionskinetik reagiert Wasserstoff äußerst schnell mit Luft. Zudem ist Wasserstoff schon bei relativ geringen Zündtemperaturen brennbar. Zur Auslösung einer Wasserstoffexplosion müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Zum einen muss ein explosionsfähiges Gemisch vorliegen, was bei einer Wasserstoffkonzentration von 4% - 75% in Luft bereits der Fall ist. Zum anderen ist eine sehr geringe Zündenergie erforderlich. Die Zündenergie kann eine lokale Temperatur über 500 °C, ein Zündfunke über 0,02 mJ, ein Katalysator, Strahlung oder Licht sein. Folgende Präventionsmaßnahmen müssen getroffen werden.

- Alle Elektroinstallationen, die sich in Reichweite von Komponenten befinden, die Wasserstoff lagern, transportieren oder zur Energieerzeugung nutzen, müssen explosionsgeschützt sein.
- Die Räume, in denen Wasserstoff verwendet oder gelagert wird, müssen intensiv durchlüftet werden, so dass keine explosionsfähige Konzentration entstehen kann. Die Räume sollten zudem konstruktiv so gestaltet werden, dass sich keine explosionsfähige Konzentration, trotz einer Durchlüftung des Raumes bilden kann.
- Alle elektrischen Komponenten (Brennstoffzellensysteme, Wandler, Wechselrichter etc.) und die Lagerung des Wasserstoffs müssen räumlich getrennt voneinander sein.
- Wasserstoffsensoren (Schnüffler) müssen in Räumen, in denen Wasserstoff gelagert, transportiert oder zur Energieerzeugung genutzt wird angebracht werden.
- In der Nähe von Wasserstoffapplikationen muss striktes Rauchverbot gelten. Zudem muss das entsprechende Personal durch Unterweisungen und Sicherheitstrainings geschult werden.

## Zulassung

In der Binnenschifffahrt existieren noch keine allgemein geltenden Vorschriften für den Einsatz und die Zulassung eines Antriebssystems basierend auf einem Brennstoffzellensystem. Jedes Schiff wird daher individuell geprüft und zugelassen. Aus diesem Grund sind die Kosten und der Zeitaufwand für den Zulassungsprozess sehr hoch. Laut DNV-GL werden allgemeine Regularien für brennstoffzellenbetriebene Schiffe im Binnenschiffverkehr nicht vor dem Jahr 2028 veröffentlicht werden.

## Herstellung

Die Herstellung von Wasserstoff kann sowohl aus regenerativen Quellen (Elektrolyse, Gasforming aus Biogas/Syngas), als auch aus fossilen Quellen erfolgen. Zukünftig ist jedoch ausschließlich die Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Quellen als ganzheitliche Lösung zu betrachten, um Emissionen weitestgehend zu vermeiden.

### **5.1.3 Hybridantrieb (Brennstoffzelle als Reichweitenerweiterung)**

Der Hybridantrieb besteht aus einem Batteriesystem und einer H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle zur Reichweitenerweiterung. Durch die Nutzung beider Technologien kann das Batteriesystem für die kalkulierten Standardanwendungen genutzt werden, während das Brennstoffzellensystem für zusätzliche Anwendungen, wie Sonderfahrten, zum Einsatz kommt. Die Brennstoffzelle wird auch in diesem Fall in ihrem optimalen Arbeitsbereich betrieben und die produzierte Energie wird in den Batterien zwischengespeichert. Die Umwandlungsverluste halten sich bei dieser Betriebsweise in Grenzen, da die Batterie zuzüglich des Batteriemanagementsystems einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 95 % aufweist. Für die Zulassung des Schiffes bestehen dieselben Anforderungen, wie bei einem reinen Brennstoffzellenantrieb. Die Batterien werden für diese Anwendung kleinstmöglich dimensioniert, so dass ihre Nennentladeleistung die Antriebsleistung in Freifahrt decken kann. Die Batterien können sowohl über einen entsprechend dimensionierten Landanschluss oder die Brennstoffzelle geladen werden.

### **5.1.4 Photovoltaikanlage**

Es ist möglich, zusätzlich eine Photovoltaikanlage auf dem Schiff zu installieren. Die produzierte Energie wird in die Batterien des Schiffes eingespeist und trägt zur Reduzierung der Ladekapazität dieser bei. Da der Energieertrag einer Photovoltaikanlage in den vorliegenden Breiten jedoch übers Jahr stark schwankt, findet er keine Berücksichtigung bei der Auslegung der Batteriekapazität, wirkt sich aber in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung positiv auf die erforderliche Stromlademenge und die Lebensdauer der Batterien aus.

Darüber hinaus ist die Außenwirkung der Photovoltaikanlage auf die Fahrgäste ein wesentlicher nicht zu unterschätzender Aspekt. So werden durch eine entsprechende Anlage die Eigenschaften eines elektrischen, emissionsfreien Schiffes nach außen sichtbar. Viele sehen den elektrischen Antrieb des Schiffes in der Photovoltaikanlage verdeutlicht und sind begeistert mit einem „Solarschiff“ zu fahren.

Eine Photovoltaikanlage ist nur im Rahmen eines Neubaus zu empfehlen, da der konstruktive Aufwand für das Bestandsschiff mit hohen Kosten verbunden ist, und auf den Nutzen der Anlage bezogen nicht wirtschaftlich ist.

### 5.1.5 Vergleich der Antriebssysteme in Bezug auf den bestehenden Dieselmotor

In der *Tabelle 7* sind die wichtigsten Parameter der verschiedenen Antriebskonzepte dargestellt. Da es sich bei der *MS Altefähr* um ein wirtschaftliches Projekt handelt, sollen die Kosten des Antriebssystems so gering wie möglich sein. Zudem sind hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichten vorteilhaft. Um einen Vergleich zwischen den Systemen ziehen zu können, werden diese Faktoren miteinander verglichen.

Für die Auslegung der Batterien, werden NMC Li-Polymer Batterien verwendet. Die Brennstoffzelle ist eine Niedertemperatur-PEM-FC. Es werden nur Systeme betrachtet, welche eine Typzertifizierung für den maritimen Bereich aufweisen, sodass ein konventioneller und sicherer Einsatz an Bord von Schiffen gewährleistet ist. Für die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff wird ein Hochdruck-Tanksystem bestehend aus Typ IV Kunststoffbehälter verwendet. Für die Speicherung von flüssigem Wasserstoff, wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem LH-Tank um eine Sonderanfertigung handelt, wodurch die Maße auf den zur Verfügung stehenden Raum angepasst werden können.

**Tabelle 7 - Vergleich der Kennwerte alternativer und konventioneller Energiesysteme**

Energiesystem					
Beschreibung	Einheit	PEMFC		NMC Li-Polymer	Dieselmotor
Gravimetrische Energiedichte	kW/kg	0,3 <sup>1</sup>		0,1 <sup>2</sup>	0,3
Volumetrische Energiedichte	kW/m <sup>3</sup> [10 <sup>3</sup> ]	0,1 <sup>1</sup>		0,1 <sup>2</sup>	0,2
Wirkungsgrad	%	50		95	40
Kosten	€/kW	1.900 <sup>3</sup>		550	300
Lebensdauer	-	30.000 h		4.500 Zyklen (80% DoD; 1C)	variabel
Energiespeicher					
Beschreibung	Einheit	CH	LH	NMC Li-Polymer	Dieselmotor
Gravimetrische Energiedichte	kWh/kg	2,0	3,8	0,1 <sup>1</sup>	11,9
Volumetrische Energiedichte	kWh/m <sup>3</sup> [10 <sup>3</sup> ]	0,5	1,3	0,1	10,0
Speicherkosten	€/kWh	30	15	550	0 <sup>4</sup>
Treibstoffkosten	€	9,50/kg	9,50/kg	0,20/kWh	1,04/l

<sup>1</sup> Zuluft- und Kühlsystem mit inbegriffen

<sup>2</sup> Annahme: Entladung bei 1C, höhere Entladungsraten möglich.

<sup>3</sup> Angebotseinholung Ballard

<sup>4</sup> Dieseltanks sind im Schiff integriert

Aus *Tabelle 7* wird zunächst ersichtlich, dass der konventionelle Dieselmotor und -kraftstoff die höchste gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte sowie die höchste Lebensdauer und geringsten Kosten aufweisen. Betrachtet man jedoch ausschließlich die alternativen Energiesysteme, so wird deutlich, dass das Brennstoffzellensystem mit der Speicherung von flüssigem Wasserstoff gegenüber dem Batteriesystem in der Lage ist wesentlich mehr Energie bei gleichem Raumbedarf zu speichern, die Kosten jedoch um ein Vielfaches höher sind. Das geeignetste Energiesystem muss daher immer auf Grundlage einer individuellen Betrachtung des Schiffstyps, der geforderten Schiffsgröße und dem gegebenen Fahrprofil (Reichweite) ausgelegt werden. Eine pauschale Aussage hinsichtlich des zu präferierenden Energiesystems anhand der gegebenen Kennwerte ist daher nicht möglich.

## 5.2 Vorschläge für eine Umrüstung

Bei einem Brennstoffzellen-Antriebssystem benötigen die Brennstoffzellen, die Wasserstofftanks und die Pufferbatterien jeweils einen eigenen Raum. Die Schaffung zusätzlicher Räume unter Deck sowie die Berücksichtigung der zusätzlichen Sicherheitsanforderungen an ein entsprechendes Antriebssystem erfordern einen unverhältnismäßig hohen Aufwand in Planung, Konstruktion und Umsetzung. Aus diesem Grund wird eine Umrüstung auf ein mit Brennstoffzellen angetriebenes Schiff als wirtschaftlich nicht darstellbar bewertet und daher im Rahmen dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Eine Umrüstung auf ein batterieelektrisches Antriebssystem ist dagegen ohne weiteres möglich, da der verfügbare Raum unter Deck ausreichend Platz für die erforderlichen Umbaumaßnahmen und die zusätzlichen Komponenten aufweist. Die Eigenschaften des Antriebssystem können dem nachfolgenden Abschnitt entnommen werden, da die selben Komponenten wie bei einem Neubau zum Einsatz kämen.

## 5.3 Vorschläge für einen Neubau

Für einen Neubau der *MS Altefähr* werden neben verschiedenen Antriebssystemen ebenfalls der Einfluss der beiden unterschiedlichen Baumaterialien Stahl und Aluminium betrachtet. Die erforderliche Brennstoffzellenleistung, Batterie- und Tankkapazität ergibt sich aus dem unter

*Abschnitt 3.3.3* definierten Fahrprofil. Im Folgenden werden die untersuchten Antriebssystemkonzepte kurz vorgestellt und erläutert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in *Tabelle 8* und *9* zusammengefasst.

### **1) Batterieelektrischer Antrieb mit bestehender Ladeinfrastruktur**

Die für den Antrieb und das Bordnetz erforderliche Leistung wird aus einem Batteriesystem generiert. Die Steuerung (Verteilung) und Überwachung übernimmt ein Energiemanagementsystem. Die Batterien sollen während der Stand- und Liegezeiten während und außerhalb der Betriebszeit über den bestehenden Landstromanschluss mit 32 A und 400 V geladen.

Anhand der Auswertung entsprechender Daten von Vergleichsschiffen wurde die erforderliche Leistung mit 360 kW (Stahl) bzw. 300 kW (Alu) abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der Zwischenladung der Batterien ab Standzeiten von 30 min wurde eine Batteriekapazität von 610 kWh (Stahl) bzw. 510 kWh (Alu) ermittelt. Die Entladungstiefe wurde auf 80% festgesetzt, um eine Herstellergarantie von 10 Jahren zu gewährleisten.

Die Berechnungen ergaben, dass ein entsprechendes Energiesystem hinsichtlich seiner volumetrischen und gravimetrischen Eigenschaften im Rumpf untergebracht werden kann.

Im Zuge der Auslegung des Batteriesystems wurde festgestellt, dass der bestehende Landstromanschluss nicht ausreichend ist, um die Batterien während der Liegezeit außerhalb der Betriebszeit vollständig zu laden. Um die Batterien während der Stand- und Liegezeiten während und außerhalb der Betriebszeit zu Laden ist ein Landstromanschluss mit mindestens 64 A und 400 V erforderlich.

### **2) Batterieelektrischer Antrieb mit aufgerüsteter Ladeinfrastruktur**

Die für den Antrieb und das Bordnetz erforderliche Leistung wird wie zuvor auch aus einem Batteriesystem generiert. Die Steuerung (Verteilung) und Überwachung übernimmt ein Energiemanagementsystem. Die Batterien werden während der Stand- und Liegezeiten während und außerhalb der Betriebszeit über einen vorgesehenen Landstromanschluss mit 125 A und 400 V geladen.

Die Leistungsanforderung stimmt mit der des zuvor beschriebenen Konzeptes weitestgehend überein und wurde somit auch für diese Anwendung übernommen. Unter Berücksichtigung der Zwischenladung der Batterien ab Standzeiten von 30 min wurde eine Batteriekapazität von 510 kWh (Stahl) bzw. 400 kWh (Alu) ermittelt. Die Entladungstiefe wurde auch in diesem Fall auf 80% festgesetzt, um eine Herstellergarantie von 10 Jahren zu gewährleisten.

Aufgrund der geringeren erforderlichen Batteriekapazität im Vergleich zum vorangegangenen Konzept, kann auch dieses Energiesystem hinsichtlich seiner volumetrischen und gravimetrischen Eigenschaften im Rumpf untergebracht werden kann.

### **3) Brennstoffzellen-Antrieb mit Pufferbatterie**

Die Pufferbatterie dient dazu bei kurzzeitigen Leistungsspitzen während des Beschleunigens und Manövrierens die Ansprechzeit der Brennstoffzelle von ca. 5 s auszugleichen. Aus diesem Grund sind die Batterien auf die Beschleunigungsleistung für die Freifahrtgeschwindigkeit ausgelegt. Da hierfür nur kurzzeitig eine hohe Leistung erforderlich ist, sind Batterien vorgesehen, die mit einer hohen Entladungsrate von 3 C entladen werden können. Dies hat zur Folge, dass eine geringere Batteriekapazität gebraucht wird, wodurch wiederum weniger Gewicht und Platz notwendig ist. Die benötigte Bordnetzleistung ist im Verhältnis zur installierten Brennstoffzellenleistung so gering, dass die Brennstoffzellen in einem Arbeitspunkt von sehr geringer Effizienz und einem folglich sehr hohen Wasserstoffverbrauch betrieben werden müssten. Um das zu vermeiden, speisen die Pufferbatterien während der Standzeiten das Bordnetz. Die Brennstoffzellen werden bei kurzen Standzeiten in Standby gefahren, wodurch sie einen Eigenbedarf zur Versorgung der Peripherie von ca. 3 kW haben. Bei längeren Standzeiten durchläuft die Brennstoffzelle einen Start-Stopp-Vorgang, wodurch der Energiebedarf durch die Peripherie entfällt. Der bestehende Landanschluss kann ebenfalls verwendet werden, um das Bordnetz während der Stand- und Liegezeiten zu speisen, bzw. die Batterien zu laden. Ein Energiemanagementsystem übernimmt die Steuerung und Überwachung der jeweiligen Energiesysteme.

Der Brennstoffzellen-Antrieb wird zum einen auf die Verwendung eines CH-Tanksystems (3a) und zum anderen auf die Verwendung eines LH-Tanksystems (3b) ausgelegt. Im Rahmen der technischen Machbarkeitsstudie wird davon ausgegangen, dass sowohl das Brennstoffzellen- als auch das Tanksystem im Schiffsrumpf untergebracht werden. Um die hohen Sicherheitsbestimmungen umzusetzen, kann es aus konstruktionstechnischer Sicht

jedoch unter Umständen von Vorteil sein, ein oder beide Systeme auf dem Haupt- oder Topdeck unterzubringen. In diesem Fall wäre auch ein Tanksystem mit Wechselbehältern denkbar. Da diese alternative Anordnung der entsprechenden Systeme einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Entwurf und die zu befördernde Passagierzahl hat, sollte dieser Ansatz im Rahmen einer Entwurfsstudie mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung untersucht werden.

Die Berechnungen ergaben, dass ein entsprechendes Energiesystem, bestehend aus den folgenden Komponenten, hinsichtlich ihrer volumetrischen und gravimetrischen Eigenschaften im Rumpf untergebracht werden können.

### *3a) Brennstoffzellen-Antrieb mit Pufferbatterie, CH-Tank*

- 500 kW Brennstoffzellensystem: 1x 100 kW, 2x 200 kW (Stahl)  
200 kW Brennstoffzellensystem: 2x 200 kW (Alu)
- CH-Tanksystem bestehend aus 33x Typ IV Kunststoffbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 230 kg H<sub>2</sub> (Stahl, bzw. Alu)
- 1x 80 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Stahl)  
1x 65 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Alu)

### *3b) Brennstoffzellen-Antrieb mit Pufferbatterie, LH-Tank*

- 500 kW Brennstoffzellensystem: 1x 100 kW, 2x 200 kW (Stahl)  
200 kW Brennstoffzellensystem: 2x 200 kW (Alu)
- LH-Tanksystem bestehend aus 2x Kryotanks mit einem Fassungsvermögen von ca. 384 kg H<sub>2</sub> (Stahl, bzw. Alu)
- 1x 80 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Stahl)  
1x 65 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Alu)

Anhand berechneter Verbrauchswerte konnte ein Tagesverbrauch in der Hauptsaison von ca. 34 kg (Stahl), bzw. ca. 30 kg (Alu) Wasserstoff ermittelt werden. Demnach wäre bei einem CH-Tanksystem eine Tankfüllung nach etwa 6 bzw. 7 Tagen und bei einem LH-Tanksystem eine Tankfüllung nach etwa 11 bzw. 13 Tagen erforderlich. Das Bunkern (Bertankung) mit gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff erfolgt entweder mobil über einen entsprechenden Tanklastwagen oder einer vom Wasser aus zugänglichen Wasserstoff-tankstelle.

#### 4) **Brennstoffzellen-Batterie-Hybridsystem**

Je nach Anforderungsprofil (Lastprofil) muss das Batteriesystem in Abstimmung mit dem Brennstoffzellensystem dimensioniert werden. Aufgrund des wechselnden Lastprofils innerhalb relativ kurzer Zeiträume während des Fährbetriebes wurden die Batterien dahingehend ausgelegt, dass der Leistungsbedarf der Antriebe und Nebenverbraucher für die gesamte Fahrzeit einer Fährfahrt über die Batterien gedeckt werden können. Die Brennstoffzelle wird in ihrem optimalen Leistungsbereich betrieben und ist darauf ausgelegt, den Verbrauch der Antriebe und Bordnetzverbraucher nach Bedarf in den Batterien zwischen zu speichern. Ein Energiemanagementsystem übernimmt auch hier die Steuerung und Überwachung der jeweiligen Energiesysteme.

Das Brennstoffzellen-Batterie-Hybridsystem wird ebenfalls zum einen auf die Verwendung eines CH-Tanksystems (4a) und zum anderen auf die Verwendung eines LH-Tanksystems (4b) ausgelegt. Auch dieses Antriebskonzept sieht vor, sowohl das Brennstoffzellen- als auch das Tanksystem im Schiffsrumpf unterzubringen. Wie zuvor beschrieben sollten auch in diesem Fall etwaige alternative Anordnungen der entsprechenden Komponenten in Betracht gezogen und untersucht werden.

Die Berechnungen ergaben, dass ein entsprechendes Energiesystem, bestehend aus den folgenden Komponenten, hinsichtlich ihrer volumetrischen und gravimetrischen Eigenschaften im Rumpf untergebracht werden können.

##### *4a) Brennstoffzellen-Antrieb mit Pufferbatterie, CH-Tank*

- 1x 100 kW Brennstoffzellensystem (Stahl, bzw. Alu)
- CH-Tanksystem bestehend aus 33x Typ IV Kunststoffbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 230 kg H<sub>2</sub> (Stahl, bzw. Alu)
- 1x 170 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Stahl)
- 1x 150 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Alu)

##### *4b) Brennstoffzellen-Antrieb mit Pufferbatterie, LH-Tank*

- 1x 100 kW Brennstoffzellensystem (Stahl, bzw. Alu)
- LH-Tanksystem bestehend aus 2x Kryotanks mit einem Fassungsvermögen von ca. 384 kg H<sub>2</sub> (Stahl, bzw. Alu)
- 1x 170 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Stahl)
- 1x 150 kWh Puffer-Batteriesystem inkl. Batteriemanagementsystem (Alu)



Sowohl die täglichen Verbrauchswerte als auch die daraus resultierenden Bunkerintervalle stimmen weitestgehend mit denen des vorangegangenen Antriebskonzeptes überein. Für das Bunkern gelten demnach ebenfalls dieselben Voraussetzungen und Möglichkeiten.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Auslegung der verschiedenen Antriebssysteme und deren Varianten können für ein Stahlschiff *Tabelle 8* und für ein Aluminiumschiff *Tabelle 9* entnommen werden.

**Tabelle 8 - Ergebnisse der Auslegung alternativer Antriebssysteme - Neubau Stahl**

Variante	Konzept	Leistung/ Kapazität	System- gewicht	Ladevorgänge pro Tag	Tankintervall	Lebensdauer Batterie / B-Zelle	Energiekosten (Strom, H <sub>2</sub> )
		kW / kWh	t	1/d	d	a	€/a
1	Batterie	610	5,78	5	-	> 10 / -	15.721
2	Batterie	510	4,78	5	-	> 10 / -	12.778
3a	B-Zelle	500 / 80	6,97	-	6 - 9	> 10 / 27	54.678
3b	B-Zelle	500 / 80	6,85	-	11 - 15	> 10 / 27	54.637
4a	Hybrid	100 / 170	5,84	-	6 - 9	> 10 / 18	54.290
4b	Hybrid	100 / 170	5,72	-	11 - 16	> 10 / 18	54.248

**Tabelle 9 - Ergebnisse der Auslegung alternativer Antriebssysteme - Neubau Aluminium**

Variante	Konzept	Leistung/ Kapazität	System- gewicht	Ladevorgänge pro Tag	Tankintervall	Lebensdauer Batterie / B-Zelle	Energiekosten (Strom, H <sub>2</sub> )
		kW / kWh	t	1/d	d	a	€/a
1	Batterie	510	4,78	5	-	> 10 / -	13.019
2	Batterie	400	3,79	5	-	> 10 / -	9.910
3a	B-Zelle	500 / 65	6,43	-	7 - 11	> 10 / 27	47.167
3b	B-Zelle	500 / 65	6,31	-	13 - 18	> 10 / 27	47.120
4a	Hybrid	100 / 150	5,64	-	7 - 11	> 10 / 18	46.880
4b	Hybrid	100 / 150	5,52	-	13 - 18	> 10 / 18	46.909

## **6. Analyse der erzielbaren Verbesserung nach einer Umrüstung unter Betrachtung verschiedener Technologieanwendungen / elektrischer Antriebsarten & Energiequellen, deren Vor- und Nachteile**

Für die Analyse der erzielbaren Verbesserung nach einer Umrüstung wurden drei Technologien miteinander verglichen. Dies sind das Bestandsystem (Diesel), ein rein elektrisches System (Batterie) und der Hybridbetrieb mit einer Brennstoffzelle (Wasserstoff).

### **6.1 Bestandsystem (Diesel)**

Das Bestandsystem hat im Vergleich die geringsten System- und Energiekosten. Es wurden Energiekosten in Höhe von 50ct pro Liter angenommen. Dem gegenüber steht ein Gesamtsystemwirkungsgrad von unter 32%. Die Emissionswerte lassen sich bei einem mittleren Verbrauch von 113 Litern pro Tag mit 110 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr beziffern. Für den Dieselbetrieb wurden Kosten in Höhe von 57€ pro Tag angesetzt. Somit ergeben sich die Jahresenergiekosten von 20.708€. Der Dieselantrieb hat im Vergleich zu den beiden andern Systemvarianten die höchsten Wartungs- und Instandhaltungskosten da es sich hierbei um Verbrennungsmotoren mit mechanischem Verschleiß handelt. Dabei wurden jährliche Wartungskosten incl. Verbrauchsmaterial in Höhe von 5.100€ angesetzt. Den Vorteilen der geringen System- und Energiekosten stehen beim Dieselsystem die hohen Abgas- und Schallemissionen sowie der geringe Gesamtsystemwirkungsgrad von < 32% gegenüber. Weiterhin besteht ein hoher Wartungs- und Instandhaltungsaufwand bedingt durch den mechanischen Verschleiß. Zudem handelt es sich bei Dieselkraftstoff aus fossilen Quellen um einen nicht nachhaltigen Kraftstoff, was zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen führt.

### **6.2 Elektrisches System (Batterie)**

Den größten Gesamtsystemwirkungsgrad von > 70% konnte das rein elektrische Antriebssystem mit Batteriespeicher erzielen. Der tägliche Gesamtenergieverbrauch liegt bei einem mittleren Bedarf von 350kWh und einem Systemwirkungsgrad von 70% bei 500kWh. Wird die

elektrische Energie zu 100% aus regenerativen und nachhaltigen Quellen zum Laden der Traktionsbatterie genutzt, so ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von bis zu 110 Tonnen pro Jahr in Bezug zum Dieselsystem. Mit dem derzeitigen elektrischen Strommix MV (68,4% aus regenerativen Quellen) ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von bis zu 75 Tonnen pro Jahr. Die Energiekosten lassen sich mit einem Arbeitspreis von 31ct/kWh und einem mittleren täglichen Bedarf von 500kWh mit 155€ pro Tag bestimmen. Dies entspricht jährlichen Energiekosten von 56.575€. Im Vergleich zum Dieselbetrieb stellt der rein elektrische Betrieb mit den aktuellen Strompreisen keine erreichbare Reduktion der Energiekosten in Aussicht. Die jährlichen Mehrkosten für Energie belaufen sich im Vergleich zum Diesel auf 35.867€. Für das rein elektrische Antriebsystem wurden Wartungskosten in Höhe von 1.100 € pro Jahr angenommen, da es sich hierbei um zumeist statische Anlagen handelt. Verschleißteile stellen hier das Kühlsystem dar, soweit vorhanden. Im Vergleich zu den beiden anderen betrachteten Technologien stellt das batterieelektrische System mit einem Gesamtsystemwirkungsgrad >70% das effizienteste System dar. Dabei werden keine Abgase oder Geräusche im Betrieb emittiert. Auch die Wartungskosten fallen vergleichsweise gering aus, da kaum mechanische Verschleißteile verbaut sind. Dem gegenüber stehen hohe Anschaffungskosten zwischen 300 und 600 € pro kWh sowie einer hohen Speichermasse von bis zu 20kg pro kWh. Weiterhin ist eine Umrüstung des Ladeanschlusses vonnöten, um die erforderlichen Energiemengen von bis zu 700kWh pro Tag übertragen zu können. Hier sollte sich der Betreiber auf lange Ladezeiten über Nacht einstellen.

### **6.3 Hybridsystem (Wasserstoff)**

Der Energieverbrauch des Wasserstoffhybridsystems beläuft sich mit einem mittleren täglichen Bedarf von 350kWh und einem Gesamtsystemwirkungsgrad von 50% auf 700kWh Wasserstoff pro Tag. Dies entspricht einer Tagesmenge von 21kg. Wird der Wasserstoff zu 100% aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt, kann eine CO<sub>2</sub>-Reduktion um bis zu 110 Tonnen pro Jahr im Vergleich zum Dieselbetrieb erfolgen. Mit 5€ pro kg Wasserstoff ergeben sich die Tagesenergiekosten in Höhe von 105€, was die Jahresenergiekosten von 38.329€ ergibt. Wie beim rein elektrischen System kann auch das Wasserstoff-Hybridsystem bei den Energiekosten nicht mit dem fossilen Dieselmotorkraftstoff konkurrieren. Es ergibt sich im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff ein Mehrkostenaufwand in Höhe von 17.621€ pro Jahr. Die Wartungskosten für Brennstoffzellen-Hybridsysteme halten sich aufgrund weniger beweglicher Verschleißteile in

Grenzen. So wurden jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 2.500€ angenommen. Das Wasserstoff-Hybridsystem ermöglicht die Reduktion der Kapazität der Traktionsbatterie auf etwa 1/6 vom rein elektrischen Batteriesystem, was sich positiv auf die Gesamtsystemkosten auswirkt. Es werden keine Abgas- und Geräuschemissionen freigesetzt. Zudem stellt die Wasserstofftechnologie einen hohen Innovationswert dar. Dem gegenüber stehen die hohen Gesamtinvestitionen und Energiekosten sowie die erforderliche große Speichermenge von Wasserstoff, um einen reibungslosen Betrieb über mehrere Tage hinweg zu gewährleisten. Aktuell befindet sich die Wasserstofftechnologie im Bereich der Schifffahrt noch immer in der Prototypenphase, was es schwierig macht, geeignete Systemausrüster für ein Gesamtsystem zu finden. Auch müssen noch die regulatorischen Rahmenbedingungen für den Betrieb solcher Anlagen geschaffen werden, um ein reibungsloses Genehmigungsverfahren zu ermöglichen.

**Tabelle 10 – Vergleich Systemtechnologie**

<b>Energiesystem</b>				
<b>Beschreibung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Batterie</b>	<b>H2-Hybrid</b>	<b>Dieselmotor</b>
Tagesenergiekosten	€/d	155	105	57
Jahresenergiekosten	€/a	56.575	38.329	20.708
Systemkosten	€	385.000	297.000	51.000
Gesamtwirkungsgrad	%	70	50	32
Lebensdauer	-	6.000 Zyklen (80% DoD; 1C)	30.000h	variabel
CO2-Ausstoß	t/a	35*	0**	110
CO2-Einsparung	t/a	75*	110**	0
Treibstoffkosten	-	0,31€/kWh	5€/kg	0,5€/l

\* Mit derzeitigem Strommix MV

\*\* Wasserstoff aus regenerativen Quellen

## **7. Analyse der notwendigen landseitigen Ladeinfrastrukturen unter Betrachtung verschiedener Technologien & Anwendungen, deren Vor- und Nachteile**

Um den reibungslosen Betrieb der alternativen Systemtechnologien zu ermöglichen, muss die benötigte Energiemenge in entsprechender Form bereitgestellt werden. Dies soll nun im Folgenden beleuchtet werden.

### **7.1 Kabel-basiert**

Der kabelbasierte Ladeanschluss bietet den Vorteil, dass sehr große Ströme verlustfrei übertragen werden können. Jedoch steht dem ein hoher Wartungsaufwand gegenüber da die Kontakte durch korrosive Einwirkung von Salz und Wasser geschädigt werden können. Bei sehr großen Übertragungsleistungen ist ein manueller Anschluss via Handbetrieb nur bedingt umsetzbar. Daher sollte eine automatisierte Kopplung erfolgen, was jedoch zu einer Kostensteigerung des Ladesystems führen kann.

### **7.2 Induktiv**

Das induktive Ladeverfahren bietet die Möglichkeit, schnell einen kontaktlosen Ladeanschluss bereitzustellen. Dabei sind die Verluste mit  $< 8\%$  in vertretbaren Bereichen. Weiterhin bietet die hermetisch abgeschlossene Induktionsplatte den Vorteil der Unabhängigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und eines somit stark reduzierten Wartungsaufwandes. Ein weiterer Vorteil liegt in der schnellen und vollautomatischen Kopplung des Ladesystems. So könnte nach jedem Anlegevorgang die Fähre kurzzeitig geladen werden, was die benötigte Akkukapazität weiter reduzieren kann. Im Mittel sind bis zu 2h Liegezeit im Hafen von Stralsund pro Tag und zwischen den Fährzielen zu erwarten. Mit entsprechend dimensionierter Ladeleistung könnte somit die Akkukapazität um 150kWh geringer ausfallen und so Kosten eingespart werden. Jedoch sind induktive Ladesysteme zumeist teurer als kabelgebundene Systeme gleicher Leistung. Eine Kosten- Nutzen- Analyse sollte im Vorfeld die entsprechenden Dimensionen aufzeigen.

### **7.3 Netzanschluss**

Da die bestehende Infrastruktur für die benötigten Energiemengen von bis zu 700kWh pro Tag nicht ausreichend ist, muss eine Erweiterung erfolgen, wenn ein rein elektrischer Betrieb vorgesehen ist. Aktuell ist ein Landanschluss (3\*32A\*400V) 22kW verfügbar. Mit einer durchschnittlichen Liegezeit von 17 Stunden pro Tag könnte so eine maximale Energiemenge von 375kWh pro Tag übertragen werden. Wird der Landanschluss auf (3\*125A\*400V) 86kW er-

weitert, so könnte eine Energiemenge von bis zu 1.466kWh/d übertragen werden. Dies entspricht in etwa der doppelten geplanten Akkukapazität des rein elektrischen Systems. Die überschüssigen Übertragungskapazitäten könnten somit für ein weiteres rein elektrisch betriebenes Fahrgastschiff derselben Größenordnung genutzt werden.

#### **7.4 Wasserstofftankstelle**

Eine Wasserstofftankstelle bietet den Vorteil, dass die benötigte chemische Energie vor Ort bereitgestellt werden kann und nicht direkt mit einem Trailer beladen werden muss. Eventuell könnte der Wasserstoff sogar vor Ort elektrolytisch hergestellt werden. Jedoch ist dafür zuvor zu prüfen, zu welchen Kosten der regenerativ erzeugte Wasserstoff zur Verfügung gestellt werden kann. Im oben genannten Szenario werden Kosten in Höhe von 5€ pro kg Wasserstoff angenommen. Wird der Wasserstoff neben dem Fährschiff auch noch öffentlich bereitgestellt, könnten die Betriebskosten weiter gesenkt werden. Die Investitionskosten für eine Wasserstofftankstelle liegen bei ca. 1,5 Millionen Euro. Weitere Verbraucher könnten PKWs und Busse des Nahverkehrs sein. Eine weitere Alternative zur Tankstelle ist der Austausch des Wasserstoffspeichers am Fährschiff. Dafür müsste jedoch der Druckspeicher am Oberdeck so aufgestellt sein, dass ein schneller Austausch erfolgen kann. In Bezug auf die Sicherheitsvorschriften muss zuvor geprüft werden, ob eine Lagerung des Wasserstoffs an Oberdeck und in Personennähe zulässig ist. Zudem wird ein hoher Wartungsaufwand der Tanksysteme erwartet, da diese beladungsbedingt einem mechanischen Verschleiß unterliegen.

### **8. Vorschlag für das geeignetste Antriebssystem**

Betrachtet und vergleicht man die in den vorangegangenen Abschnitten getroffenen Annahmen, Aussagen und Ergebnisse bezüglich der untersuchten Antriebskonzepte im Hinblick auf Investitionskosten, Betriebskosten, Leistung bzw. Kapazität, Systemgewicht und Bauvolumen, so kommt man zu dem Schluss, dass sowohl für den Umbau als auch den Neubau der batterieelektrische Antrieb das geeignetste Antriebssystem darstellt.

Mit einer Aufrüstung der Ladeinfrastruktur auf einen leistungsstärkeren Anschluss von 125 A bei 400 V, kann die benötigte Batterieanzahl noch einmal wesentlich reduziert werden, was sich wiederum auf die Investitionskosten, das Systemgewicht und die Leistungsfähigkeit des Schiffes positiv auswirkt.

Es bleibt noch einmal zu erwähnen, dass das batterieelektrische Antriebssystem basierend auf das erstellte Fahrprofil, ausgehend vom aktuellen Fahrplan, ausgelegt wurde. Derzeit werden jedoch über dem bestehenden Fahrplan hinaus zusätzliche Sonderfahrten angeboten. Die

Anzahl der Sonderfahrten pro Jahr und die entsprechenden Fahr- und Lastprofile liegen jedoch nicht vor, sodass diese bei den vorangegangenen Betrachtungen und Berechnungen nicht berücksichtigt werden konnten. Für den Fall, dass Sonderfahrten einen wesentlichen Teil des Geschäftsmodells präsentieren, ist im Rahmen weiterer Untersuchungen zu prüfen, inwieweit sich die höhere Investition in ein Brennstoffzellen-Batterie-Hybridsystem empfiehlt. Die Verwendung einer Brennstoffzelle, die lediglich als Reichweitenerweiterung für Sonderfahrten genutzt wird, ist dagegen nicht in Betracht zu ziehen, da die Kosten für Anschaffung und Betrieb zu hoch sind, wenn ein solches System nicht regelmäßig betrieben wird.

Weiterhin sollte die Zwischenladung des Fährgastschiffes mit in Betracht gezogen werden, da sich somit die nötige Akkukapazität weiter reduzieren lässt. Dies schließt jedoch ein automatisiertes, schnellladefähiges Anschlussystem mit ein, was zu einer Erhöhung der Investitionskosten führen kann. Hier sollte geprüft werden, inwieweit die Kosten für die eingesparte Akkukapazität die nötige Ladeinfrastruktur decken können. Ein automatisiertes Ladesystem entlastet zudem die Besatzung und kann möglichen Ausfällen entgegenwirken.

## **9. Abschätzung der landseitigen Investitionskosten f.d. Ladeinfrastruktur**

Da im rein elektrischen Betrieb, der aktuell vorhandene landseitige elektrische Anschluss den Bedarf von bis zu 700kWh pro Tag nicht decken kann, wird eine Umrüstung auf eine Anschlussleistung von 215kW empfohlen. Für die Mittelspannungsseitige Erschließung und Wandlung über eine Trafostation auf das Niederspannungsniveau wird eine Kostenpauschale von 25.000€ netto angenommen. Die weiteren Kosten sind abhängig vom Ladeverfahren, und variieren zwischen 70.000 und 150.000 Euro. Die günstigste Umsetzung einer Lademöglichkeit besteht im Betrieb einer (DC) Schnellladesäule, welche auch von anderen Verbrauchern genutzt werden könnte. Die Kosten für ein 150kW-System belaufen sich auf ca. 68.000€ netto. Jedoch muss dabei beachtet werden, dass das Fahrgastschiff täglich nach der letzten Fahrt manuell an das Ladesystem angeschlossen wird. Andernfalls kann die Reichweite der Bordbatterie den Fährbetrieb am Folgetag nicht gewährleisten. Alternativ zur Ladesäule bieten sich automatisierte Systeme an, welche besonders für den Fährbetrieb geeignet sind. Die Mehrkosten solcher Systeme von bis zu 100.000€ müssten allerdings mit der Reduzierung der Traktionsbatterie verglichen und ein Kostenoptimum ermittelt werden.

## 10. Zulassungsvoraussetzungen für Binnenschiffe

Für die Zulassung von Binnenschiffen gelten die Vorschriften der Binnenschiffverkehrsuntersuchungsordnung (BinSchUO), welche sich wiederum weitestgehend auf den Europäischen Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN) bezieht. Da gerade im Bereich alternativer Antriebskonzepten in den genannten Regelwerken bisher kaum Vorschriften existieren und die Implementierung neuer Vorschriften zahlreicher bürokratischer Prozesse unterliegt, kann es unter Umständen erforderlich sein, sich bei der Auslegung solcher Antriebssysteme an bestehende Zulassungsvoraussetzungen der Klassifikationsgesellschaften zu orientieren. Aus diesem Grund sollen im Folgenden auch die Vorschriften und Regularien der Klassifikationsgesellschaften am Beispiel von DNV GL näher betrachtet werden. Im Zuge des technischen Fortschritts werden sich aktuelle Vorschriften stetig ändern und angepasst sowie neue Vorschriften und Regularien erlassen, weshalb diese Ausführungen nur den gegenwärtigen Sachstand wiedergeben.

Bei der Auslegung und dem Einbau eines Hybridantriebs müssen sowohl die Vorschriften für einen batterieelektrischen Antrieb als auch die für einen Brennstoffzellen-Antrieb erfüllt sein.

### 10.1 Zulassungsvoraussetzungen von batterieelektrischen Antriebssystemen

Da das batterieelektrische Antriebssystem bereits relativ weit verbreitet ist, besitzen sowohl die BinSchUO (ES-TRIN) als auch Klassifikationsgesellschaften bereits entsprechende Vorschriften und Regularien. Im Folgenden werden die Zulassungsvoraussetzungen der BinSchUO (ES-TRIN) und von DNV-GL gegenübergestellt. Die umfangreicheren Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften resultieren in der Regel aus ihrem Hauptanwendungsgebiet – den Hochseeschiffen, weshalb eine Anpassung der jeweiligen Bestimmungen auf ein entsprechendes Binnenschiff in Abstimmung mit der Klasse erforderlich ist.

#### Zulassungsvoraussetzungen nach BinSchUO (ES-TRIN)

Die Zulassungsvoraussetzungen der BinSchUO (ES-TRIN) stützen sich primär auf die Anwendung von Blei- und Nickelakkumulatoren, welche in der Regel für ein batterieelektrisches Antriebssystem keine Anwendung finden und zudem eine andere Betriebsweise als die Lithium-Akkumulatoren aufweisen. Dennoch müssen die jeweiligen Vorschriften in der Binnenschiffahrt berücksichtigt werden.

Bei einem batterieelektrischen Antriebssystem muss das Batteriesystem redundant sein. Das heißt, dass zwei voneinander unabhängige Batteriesysteme installiert sein müssen, so dass bei Ausfall eines Batteriesystems das Schiff manövrierfähig bleibt. Die Akkumulatoren dürfen



sich während des Betriebs nicht verschieben und sie müssen leicht zugänglich sein. Zudem darf die Batterie keiner großen Hitze, Kälte oder Dreck und Spritzwasser ausgesetzt sein. Befinden sich die Akkumulatoren in geschlossenen Räumen, so müssen diese belüftet werden. Die Ventilation darf hierbei nicht funkenbildend oder elektrostatisch aufladbar sein.

### **Zulassungsvoraussetzungen nach DNV-GL**

Die Klassifikationsgesellschaft DNV-GL berücksichtigt für ihre Regularien Lithium-Ionen-Batterien und elektrochemische Kondensatoren. Anders als in der BinSchUO (ES-TRIN) sind die Vorschriften implizit auf die Systematik der Lithium-Ionen angepasst.

### Unterbringung des Elektrischen-Speicher-Systems (ESS)

Die ESS-Räume sind hinter dem Kollisionsschott anzuordnen. Der ESS-Raum darf keine anderen, für den Schiffsantrieb relevanten Systeme bzw. Rohre und Kabel, welche andere Räume versorgen, beinhalten. Hierdurch wird sichergestellt, dass bei einer Fehlfunktion der Batterie (z.B. thermal runaway) das Schiff einsatz- und manövrierfähig bleibt. Zudem dürfen sich keine Wärmequellen oder Objekte mit einem hohen Brandrisiko in den Batterieräumen befinden. Die Wände der Batterieräume müssen Teil der Schiffsstruktur oder eine Umschließung mit gleichwertiger struktureller Integrität sein.

### Ventilation der ESS-Räume

Die ESS-Räumen müssen mit einer mechanischen Ventilation ausgerüstet sein. Für die Feststellung eines Gasaustritts durch die Batterien müssen geeignete voneinander unabhängige Gasdetektoren im ESS-Raum installiert sein. Unabhängig bedeutet, dass die Systeme durch unterschiedliche Stromkreise versorgt werden, so dass der Ausfall eines elektrischen Kreises, nicht das Gesamtsystem betrifft. Das Ventilationssystem darf nicht funkenbildend sein und muss von anderen Ventilationssystemen auf dem Schiff unabhängig sein. Das Ventilationssystem muss entweder kontinuierlich laufen, oder sich selbstständig bei einer Gasdetektion anschalten können. Im Fahrstand des Schiffes werden die Temperatur des Brennstoffzellenraums und der Betriebszustand des Ventilationssystems angezeigt. Zudem wird ein Alarm ausgelöst, wenn das Ventilationssystem ausfällt. Hierfür wird eine lokale Start/Stop-Funktion integriert, welche bei Ausfall des automatischen Kontrollsystems eine manuelle Bedienung, ohne Betreten des ESS-Raums, ermöglicht. Der Abluftausgang der ESS-Räume wird mit einem Kugelradius von 1,5 m als Gefahrenzone 2 klassifiziert.

## Brandschutz

Die Türen zum ESS-Raum müssen geschlossen mit Alarmfunktion oder selbstschließende Türen sein. Unabhängige Rauchwarnmelder sind im ESS-Raum anzubringen, welche den Alarm in den Fahrstand weiterleiten. Die Feuerwiderstandsfähigkeit (Isolierung) der EES-Räume muss mindestens A-0 entsprechen und gegenüber, geschlossenen Laderäumen für die Beförderung gefährlicher Güter sowie Sammel- und Einbootungsstationen für Fahrgast-schiffe eine Feuerwiderstandsfähigkeit von A-60 aufweisen.

EES-Räume müssen durch ein fest eingebautes Feuerlöschsystem mit vollständiger Flutung geschützt sein, das für die Verwendung in entsprechenden Maschinenräumen geeignet ist.

## Batteriesystem

Für die Auslegung des batterieelektrischen Antriebs werden ausschließlich Systeme angewandt, welche eine Typenzulassung für den maritimen Verkehrssektor aufweisen können. Daher fallen alle Anforderungen, die laut den Klassifikationsgesellschaften von dem Batteriesystem erfüllt werden müssen, in den Verantwortungsbereich des Systemlieferanten bzw. des Systemherstellers.

## **10.2 Zulassungsvoraussetzungen von Brennstoffzellen-Antriebssystemen**

Für die Zulassungsvoraussetzungen eines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebssystems wurden die Regularien der Klassifikationsgesellschaft DNV-GL herangezogen. Diese Regularien beziehen sich primär auf den Betrieb von Brennstoffzellen mit LNG, sie sind jedoch auch für den Betrieb mit Wasserstoff zulässig. Zulassungsvoraussetzungen für wasserstoffbetrie-bene Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt gibt es gegenwärtig nicht.

## Unterbringung des Brennstoffzellenraums

Brennstoffzellenräume dürfen sich nicht in Fahrgast-, Service-, oder Maschinenräumen befinden. Die Abgrenzungen des Brennstoffzellenraums müssen gasundurchlässig zu anderen abgeschlossenen Räumen innerhalb des Schiffes sein. Zudem darf sich durch die Konstruktion des Brennstoffzellenraums keine explosive Gaszusammensetzung trotz Ventilation bilden können. Es wird daher empfohlen, dass die Decke zum Abluftausgang leicht gewölbt ausgeführt wird. Die Oberfläche der Komponenten innerhalb des Brennstoffzellenraums darf die Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff nicht erreichen. Alle treibstoffführenden Leitungen müssen aus geschweißten Edelstahlrohren bestehen. Die Brennstoffzelle muss in jeglichem Betriebszustand von der elektrischen Versorgung getrennt werden können. Rückleitungen aus dem Wechselrichter müssen ausgeschlossen werden.

### Ventilation der Brennstoffzellenräume

Wie bei den Batterieräumen müssen Brennstoffzellenräume mit einem mechanischen, nicht funkenbildenden Ventilationssystem ausgerüstet sein. Das Ventilationssystem soll in jedem Betriebszustand (auch bei Leckagen) die Gaskonzentration unter der unteren Explosionsgrenze halten. Das Ventilationssystem muss durch unabhängige Stromkreise versorgt werden. Die Ventilationsschächte und Brennstoffzellenräume müssen so konstruiert sein, dass sich keine wasserstoffangereicherten Mischungen bilden können. Aufgrund des hohen Sicherheitsrisikos durch Wasserstoff muss das System redundant sein. Daher müssen zwei unabhängige Ventilatoren, welche jeweils 100% des notwendigen Luftdurchsatzes aufbringen können, installiert werden. Im Falle eines Unterdrucks im Brennstoffzellenraums oder einer Fehlfunktion des Ventilators muss die Wasserstoffzufuhr automatisch gestoppt werden.

### Brandschutz

Die Räume, in denen das Brennstoffzellensystem, Tanksystem, Batteriesystem sowie Energieversorgungs- und Verteilsystem untergebracht sind, müssen einer Feuerwiderstandsfähigkeit von A-60 entsprechen. Ein fest installiertes Brandmeldesystem muss in den Brennstoffzellenräumen integriert sein. Rauchwarnmelder sind aufgrund der Eigenschaften des Wasserstoffbrands nicht zulässig. Jeder Brandmelder muss voneinander unabhängig sein. Das Ventilationssystem ist mit Brandschutzklappen ausgerüstet, welche sich bei der Auslösung des Brandmelders selbstständig schließen. In diesem Fall wird das Ventilationssystem automatisch ausgeschaltet. Zudem wird ein auf Wasserstoff angepasstes Brandlöschsystem für die Brennstoffzellenräume vorausgesetzt.

### Gefahrenzonen

Das Schiff ist rund um das Brennstoffzellen- und Wasserstoffversorgungssystem in Gefahrenzonen zu unterteilen, in denen ausschließlich für die entsprechende Zone zugelassene elektrische Systeme zum Einsatz kommen dürfen. Elektrisches Equipment sollte nicht in Gefahrenzonen installiert werden, es sei denn es ist für den Betrieb unersetzlich. Die Gefahrenzonen auf dem Schiff werden in 3 Kategorien unterteilt:

- 1) *Gefahrenzone 0*: Hierzu zählen das Innere der Wasserstofftanks, der Rohrleitungen und der Komponenten, die Wasserstoff enthalten. Zudem gehören Druckminderer und druckentlastete Rohrleitungen zur Gefahrenzone 0. Alle Komponenten und elektrische Apparaturen, welche in Kontakt mit Wasserstoff stehen und nicht räumlich getrennt

werden können, müssen ebenfalls auf die Anforderungen der Gefahrenzone 0 angepasst sein, welche abhängig von der jeweiligen Komponente und dem eingesetzten Treibstoff bzw. Gefahrstoff sind.

- 2) *Gefahrenzone 1*: Hierzu zählen die Brennstoffzellenräume, sowie die Abluftaustritte der Brennstoffzellenräume und abgeschlossene bzw. teilweise abgeschlossene Räume, in denen Treibstoff lagert. Von Gas- oder Ventilationsaustritten weitet sich die Gefahrenzone 1 in Flächen auf offenem Deck oder teilweise abgeschlossenen Räumen in einem Kugelradius von 3 m aus. Von Brennstoffzellenabluftaustritten weitet sich die Gefahrenzone 1 in den genannten Bereichen in einem Kugelradius von 1,5 m aus.
- 3) *Gefahrenzone 2*: Hierzu zählen Zonen, welche mit einem Abstand von 1,5 m die Zonen der Gefahrenzone 1 umgeben.

### Brennstoffzellensystem

Für die Auslegung des Brennstoffzellen-Antriebssystems werden ausschließlich Systeme angewandt, welche eine Typenzulassung für den maritimen Verkehrssektor aufweisen können. Daher fallen alle Anforderungen, die laut den Klassifikationsgesellschaften von dem Batteriesystem erfüllt werden müssen, in den Verantwortungsbereich des Systemlieferanten bzw. des Systemherstellers.

## **11 Vorschläge zum Betrieb der landseitigen Ladeinfrastruktur**

Im Folgenden werden kurz die möglichen Betriebsszenarien der landseitigen Ladeinfrastruktur erläutert. Dafür werden folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen:

### **11.1 Potenzielle Betreiber**

Als potenzielle Betreiber der Energieversorgung kommen die Weiße Flotte und die Stadtwerke Stralsund (SWS) in Frage. Falls die Weiße Flotte den Betrieb der Ladeinfrastruktur selbst übernehmen will, könnten aus wirtschaftlichen Gründen auch mehrere Schiffe der Flotte elektrifiziert und mit Energie versorgt werden. Mit einer Anschlussleistung von 215kW lassen sich in 24h 5.160kWh übertragen. Somit könnten 7 Schiffe der Baugröße der MS-Altefährl mit jeweils 700kWh Energiespeicherkapazität versorgt werden. Jedoch entfällt dann die Möglichkeit einer Versorgung von externen Verbrauchern wie E-Kfz und Elektrobussen sowie eine damit verbundene Vergütung. Alternativ könnten auch die Stadtwerke vom Betrieb der Ladeinfrastruktur profitieren. Mit der weißen Flotte wäre ein fester Abnehmer verfügbar, wodurch ein wirtschaftlicher Betrieb gewährleistet ist. Weiterhin könnte die Energie auch dem öffentlichen Nahverkehr zur Verfügung gestellt und somit die Wirtschaftlichkeit noch weiter gesteigert werden.

## 11.2 Betreiberformen (kommunal & PPP-Modell)

Für den Betrieb der landseitigen Ladeinfrastruktur sind zwei mögliche Betreiberformen denkbar. Zum einen könnte die Energieversorgung in öffentlicher Hand verbleiben und somit eine stabile Energieversorgung gewährleistet werden. Oder es wird eine Public Private Partnership (PPP) etabliert, und eine Wasserstofftankstelle mit vertraglich festgelegten Abnahmemengen wirtschaftlich betrieben. Weiterhin ist auch eine Kooperation aus ÖPNV und der SWS am Seehafen Stralsund denkbar, um eine Versorgung mit grünem Wasserstoff zu gewährleisten.

## 12 Schlussfolgerung und Erkenntnisse für vergleichbare Projekte

Im Folgenden werden die gewonnen Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie zusammengefasst und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Projekte erörtert. Vorab sei jedoch bereits darauf hingewiesen, dass die Herausforderung im Schiffsentwurf in der Lösung eines Optimierungsproblems besteht, da alle Parameter des Schiffes in ständiger und gegenseitiger Wechselwirkung stehen. Das heißt, dass die Änderung eines Parameters in den Anforderungen oder am Schiff, die Änderung aller anderen Parameter zur Folge hat.

### 12.1 Reichweiten, Wind- und Wetterverhältnisse

In Abhängigkeit vom Anwendungszweck und dem Einsatzgebiet sowie dem daraus resultierenden Anforderungsprofil werden die Hauptparameter des Schiffes, wie Abmessungen, Tragfähigkeit, Reichweite und Geschwindigkeit definiert. Darauf basierend wird die erforderliche Antriebsleistung berechnet und das entsprechend geeignetste Antriebssystem ausgelegt. Aus diesem Grund sind Schiffe in der Regel als spezialisierte Prototypen zu betrachten, weshalb eine Änderung der Anforderungen, wie zum Beispiel höhere Distanzen, nur in sehr begrenztem Rahmen möglich sind und daher individuell untersucht, geprüft und bewertet werden müssen.

Bei der Berechnung der erforderlichen Antriebsleistung und der anschließenden Auslegung des Antriebssystems werden Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, die in der sogenannten Sea Margin zusammengefasst sind und eine Leistungs- bzw. Kapazitätsreserve darstellt. Die Sea Margin ist unter anderem vom Schiffstyp und dem Einsatzgebiet des Schiffes abhängig und berücksichtigt zusätzliche Widerstände aufgrund von schlechten Wetterverhältnissen, wie starkem Wind und Seegang, Strömung und Bewuchs (Muscheln, etc) am Schiffsrumpf. In der Regel wird bei Festlegung der Sea Margin auf Erfahrungswerte, das jeweilige Einsatzgebiet betreffend, zurückgegriffen. Im Falle der *MS Altefähr*, die im Binnengewässer im Sund zwischen Altefähr und Rügen fährt, beträgt die Sea Margin ca. 15 %.

## 12.2 Schiffsgröße- und Typ / Kapazität

Eine pauschale Übertragung der Kennwerte des ausgelegten Antriebssystems auf andere Schiffstypen oder -größen ist ebenso, wie im vorangegangenen Abschnitt 12.1 erläutert, nicht ohne weiteres möglich. Auch in diesem Fall bedarf es neuer Berechnungen und Auslegungen, da Faktoren, wie die Reichweite, Geschwindigkeit, Tragfähigkeit und das Schiffgewicht einen erheblichen und unmittelbaren Einfluss auf die erforderliche Antriebsleistung und die Tank-, bzw. Batteriekapazität des Schiffes haben. Darüber hinaus muss stets überprüft werden, ob der zur Verfügung stehende Stauraum und die Verdrängung des Schiffes für die Integration des dimensionierten Antriebssystems ausreichen.

## 12.3 Landseitige Ladeinfrastrukturen und Anzahl der Abnehmer

Der Ausbau der landseitigen Ladeinfrastruktur kann einige technische Herausforderungen beinhalten. Bei der Ladung von batterieelektrischen Schiffen können folgende Engpässe entstehen.

### 1) Zeitlicher Engpass:

Für Schiffe mit einer hohen Batteriekapazität an Bord ist in der Regel eine lange Ladezeit während der außerbetrieblichen Liegezeit (über Nacht) erforderlich. Daher ist es nicht möglich, mehrere Schiffe über denselben Anschluss zu versorgen. Mit der Installation eines Schnellladeanschlusses ließen sich dagegen Schiffe einsetzen, die ausschließlich mit dem Zwischenladen ihrer Batterien auskommen. Auf diese Weise ist es möglich, eine höhere Anzahl an Schiffen zu betreiben, deren jeweilige Ladezeiten auf die Fahrpläne abgestimmt werden können.

### 2) Energetischer Engpass:

Nicht jedes Hafennetz ist auf die Abnahme von hohen Leistungen ausgerüstet. Um eine entsprechende Ladeinfrastruktur zu implementieren, die für die Ladung des Schiffes (bzw. mehrerer Schiffe) ausgelegt ist, muss gegebenenfalls auch die Netzinfrastruktur zur Ladestation ausgebaut werden.

### 3) Räumlicher Engpass:

Die Installation mehrerer Ladestationen bedingt unter Umständen einen räumlichen Engpass. Die mögliche Anzahl an zu installierenden Ladeanschlüssen begrenzt somit

gegebenenfalls die Anzahl batterieelektrischer Schiffe, die zeitgleich geladen werden müssen.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass die Errichtung einer landseitigen Ladeinfrastruktur im Rahmen einer strategischen Planung zunächst mit einer Prüfung und Beurteilung von Anforderungen und Machbarkeiten verbunden ist. Können alle Anforderungen erfüllt werden, bietet der Netzausbau eine gute Möglichkeit zusätzliche Ladestationen für Elektroautos auf den Kundenparkplätzen der Fahrgastschiffe zu berücksichtigen.