Anlage 1
(zu Nr. 4.5 NKBF2017)
(zu Nr. 4.4 NABF2017)

Abschlussbericht

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
APEX Energy GmbH Hans-Adam-Allee 1 18299 Laage	03RU1U012B

Vorhabenbezeichnung:

RUBIN – E2MUT – Emissionsfreie Elektromobilität für maritime urbane Transporte

VP2: Antriebssysteme und Energiebereitstellung

TP2.2: Konzeptionelle Entwicklung eines modularen, adaptiven, skalierbaren H2-Systems zur Stromerzeugung auf maritimen Transporteinheiten

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2021 – 31.08.2024

Teil I: Kurzbericht

Das Teilprojekt 2.2 im Rahmen des Projekts RUBIN-E2MUT ist die konzeptionelle Entwicklung eines modularen, adaptiven, skalierbaren H2-Systems zur Stromerzeugung auf maritimen Transporteinheiten. Die Aufgabe beinhaltet die Zusammenstellung und Betrachtung verschiedener schiffsseitiger Konzepte unter deren Verwendung die Energie für die maritime Elektromobilität bereitgestellt werden kann. Diese sollen modular sowie anwendungsfallspezifisch erweiterbar gestaltet werden. Es müssen Wasserstoffbereitstellung, -speicherung und -betankung, sowie dazu passende Ladetechnologien für maritime Transporteinheiten entwickelt und bewertet werden. Das Vorhaben wird in enger Abstimmung mit den Projektpartnern aus den Bereichen Schiffsentwicklung, Schiffsneubau und Retrofit durchgeführt, wobei APEX Energy als Antragsteller maßgeblich für die Systemkonzeption der schiffsseitigen Energiebereitstellung und deren Bewertung mittels Simulationen verantwortlich ist. Die parallel im TP1.3 erarbeiteten Ergebnissen stehen in einem engen inhaltlichen Zusammenhang. Beide Konzeptentwicklungen, die landseitige Infrastruktur und die schiffsseitige Energiebereitstellung sind aufeinander abgestimmt.

Einzelkomponenten wie Brennstoffzellen, Druckgasspeicher, LOHC-Systeme und Flüssigwasserstoffspeicher sind in den Bereichen Industrie und Mobilität landseitig bereits heute Stand der Technik und teilweise serienmäßig verfügbar. Im Bereich der maritimen Mobilität gibt es spezifische Herausforderungen, die dazu geführt haben, dass die Systeme nur unter großem Aufwand oder gar nicht eingesetzt werden können. Besonders die Auslegung und Integration der Energiebereitstellung auf Wasserstoffbasis in modularen und skalierbaren Architekturen gestaltet sich als eine logistische, technologische und regulative Herausforderung. Dabei kann die gezielte Verwendung von einer Simulation, mit der Berücksichtigung aller relevanten Parameter, mögliche Szenarien/Betriebsfälle abbilden und eine fundierte Auswahl der besten Systemkomponenten ermöglichen. Eine Betrachtung weiterer innovativer Energieträger wie die LOHC-Ameisensäure, oder ähnliches ist genauso möglich und zukünftig leicht auf weitere Technologien erweiterbar.

Das Teilprojekt ist in vier Phasen untergliedert und hat 3 Meilensteine:

In der Analysephase (Monate 1-6) ist es gelungen, eine Analyse der Anforderungen an skalierbare Wasserstoffenergiesysteme nach deren Typ und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme durchzuführen. Unterstütz wurde die Arbeit erfolgreich durch einen Unterauftrag beim Fraunhofer IEE.
Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Konzeptionsphase (Monate 7-18), in der skalierbare Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich des Typs und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme konzipiert wurden. Weiter wurden Konzepte zu skalierbaren Wasserstoffenergiesystemen hinsichtlich der Art der Betriebsszenarien gebildet.
In der Entwicklungsphase (Monate 19-30) konnte eine Simulationslösung für skalierbare Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich des Typs und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme erstellt werden. Es gelang die die Entwicklung skalierbarer Wasserstoffenergiesysteme nach deren Typ und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme. Gemeinsam mit den Projektpartnern und besonders der Werft Tamsen konnte erfolgreich eine HAZID-Studie zu dem gewählten Schiffsdesign „Schnelles Städteshuttle“ (siehe Abbildung 1) durchgeführt werden.
In der der darauffolgenden letzten Integrationsphase (31-36) wurde eine Optimierung der skalierbaren Wasserstoffenergiesysteme nach deren Typ und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme durchgeführt. Besonders die notwendigen Regulatorischen Anforderungen und zum Teil noch nicht finalen Vorschriften seitens der Schiffsklassifizierungsgesellschaften konnten hier untersucht werden und durch den Kontakt zu der Klassifizierungsgesellschaft Lloyd’s Register mitgestaltet werden.

Es ist gelungen, eine umfangreiche Zusammenarbeit mit den Partnern im Projekt umzusetzen. Der enge Ideenaustausch hat die Konzeptentwicklung zu einer breit abgestimmten und umfangreich die Bedürfnisse der einzelnen Interessensgruppen berücksichtigende Arbeit geführt. Für das ganzheitlich zwischen der Landseite und der Schiffsseite abgestimmte Energiebereitstellungssystemkonzept, welches die Verwendung von druckgespeichertem Wasserstoff vorsieht, konnten reale Gegebenheiten berücksichtigen werden und Modularität, sowie Skalierbarkeit sehr genau dargestellt werden. Als wichtiger Teil der Ergebnisse gilt auch die im Projekt erarbeitet Fähigkeit in Zukunft neue Systeme, über die im Projekt betrachteten Konzepte hinaus, mittels Simulation zu bewerten, um Grundlagen und Grenzen von Betriebsszenarien auf maritimen Einheiten zu beschreiben.

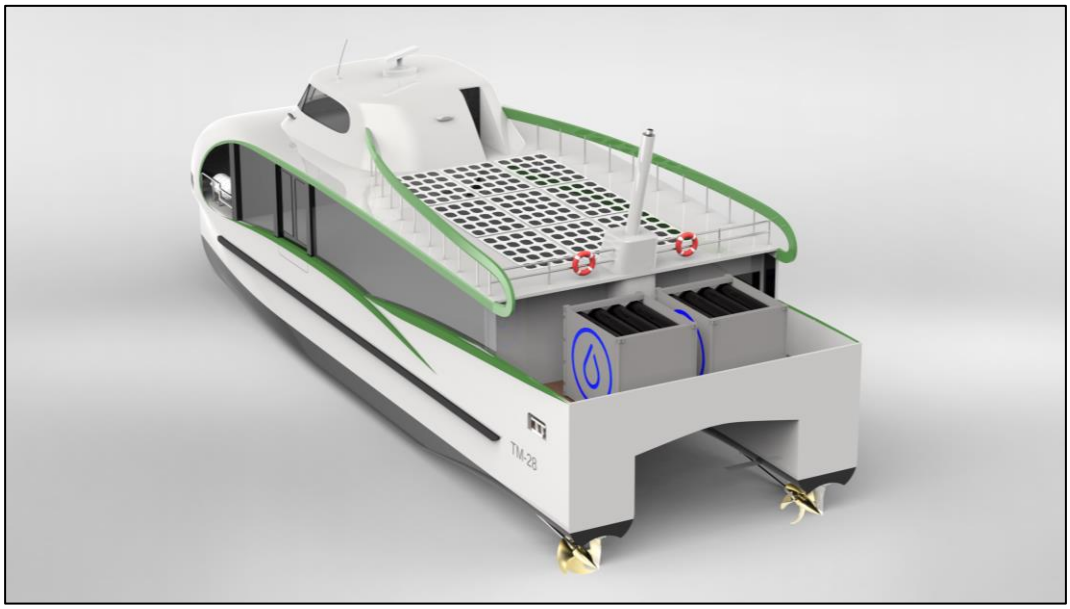


Abbildung 1: Konzeptbild des schnellen Städteshuttles mit integrierten 10 ft Wasserstoffdruckspeichercontainer [Quelle: Tamsen Maritim]

Anlage 1
(zu Nr. 4.5 NKBF2017)
(zu Nr. 4.4 NABF2017)

Abschlussbericht

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
APEX Energy GmbH Hans-Adam-Allee 1 18299 Laage	03RU1U012B

Vorhabenbezeichnung:

RUBIN – E2MUT – Emissionsfreie Elektromobilität für maritime urbane Transporte

VP2: Antriebssysteme und Energiebereitstellung

TP2.2: Konzeptionelle Entwicklung eines modularen, adaptiven, skalierbaren H2-Systems zur Stromerzeugung auf maritimen Transporteinheiten

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2021 – 31.08.2024

Teil II: Eingehende Darstellung

AP 1 - Analyse der Anforderungen an skalierbare Wasserstoffenergiesysteme nach deren Typ und deren Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme

Als Ressource im Arbeitspaket 1 kam die Zuarbeit durch einen Unterauftragnehmer, dem Fraunhofer IEE in Kassel, zum Tragen. In Kooperation mit dem Institut erfolgt eine ausführliche Analyse hinsichtlich rechtlicher Randbedingungen im maritimen Sektor. Es wird auf die Energiebereitstellung durch Wasserstoff auf maritimen Transporteinheiten Bezug genommen. Das Arbeitspaket gehört zur Analysephase des Teilprojekts 2.2.

- **Recherche und Analyse der Anforderungen an elektrische Versorgungssysteme von Schiffen auf Basis von gegenwärtig gültigen Regelwerken**

Die Analyse der Anforderungen an elektrische Versorgungssysteme von Schiffen orientiert sich an den aktuell geltenden Vorschriften und Normen, insbesondere an den technischen Vorschriften der Binnenschiffe, ES-TRIN, sowie relevanten internationalen Standards. Ein wesentlicher Aspekt der ES-TRIN-Vorschriften ist die Unterteilung der elektrischen Versorgungssysteme in mehrere Kategorien, wovon die drei folgenden für den Einsatz von wasserstoffbasierten Energieträgern besonders relevant sind: Energieversorgungssysteme, Explosionsschutz und allgemeine Bestimmungen für elektrische Antriebe. Diese Kategorien bilden die Grundlage für die Integration von Brennstoffzellensystemen in die maritime Infrastruktur.
Die Energieversorgungssysteme bei Schiffen mit elektrischen Anlagen müssen laut ES-TRIN mindestens zwei unabhängige Energiequellen besitzen, die beim Ausfall einer Quelle die sichere Versorgung für mindestens 30 Minuten gewährleisten (Artikel 10.02 § 1). Somit wäre etwa zusätzlich zu einer Wasserstoffenergiebereitstellung eine Pufferbatterie notwendig, um die elektrische Versorgung redundant abzusichern.
Für den Explosionsschutz gilt, dass wasserstoffbedingte Explosionsrisiken Schutzmaßnahmen gemäß EN 60079-10-1:2015 und EN 60079-10-2:2015 erfordern und Geräte in explosionsgefährdeten Zonen den Vorgaben der EU-Richtlinie 2014/34/EU entsprechen müssen. Dem zu Folge sind für den Einbau von Schaltschränken, Elektromotoren und anderen technischen Geräten in einer Explosionsschutzzone an

Bord, die Explosionsschutzeigenschaften zu berücksichtigen.
Die Regularien bieten klare Vorgaben zur sicheren Integration von Brennstoffzellensystemen und bilden somit die Grundlage für die Entwicklung zukunftsfähiger Wasserstoff-Energiesysteme im Schiffsbereich.

- **Recherche zur allgemeinen Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von elektrischen Versorgungseinrichtungen auf Schiffen hinsichtlich verschiedener Brennstoffzellentypen**

Die Anforderungen an Energiebereitstellungssysteme variieren je nach Schiffstyp, Fahrstrecke und Hafenliegezeit. Brennstoffzellen können je nach Art und Einsatzszenario als rein elektrischer Antrieb bzw. als Hauptaggregat (FCEV), im hybriden Antriebskonzept als Nebenaggregat oder zur Energiebereitstellung als Generator für „Cold Ironing“ dienen, bei dem das Schiff im Hafen autark mit Energie versorgt wird. Eine erfolgreiche Implementierung erfordert eine genaue Analyse des Energiebedarfs unterschiedlicher Schiffstypen und Anwendungsszenarien:

Schiffstyp/Applikation	Energiebereitstellung [MW]
Fähren	
Kleine Fähren	0,24 -1,0
Große Binnenfähren	2-12
Große Seefähren	20-44
Frachtschiffe	
Binnen Frachtschiff	0,2-4,5
Flusskreuzfahrschiff	< 2
Schlepper	10
„Cold Ironing“	
Container Schiff	0,2-0,9
Tanker	< 3
Kreuzfahrtschiff	
Hotelbetrieb	3-10
Hafenmanöver	20
Notstrom	2-4
Antriebs	25 - 97

Tabelle 1: Energiebedarf von Schiffen nach Schiffstyp und Applikation

Die auf dem Markt verfügbaren Brennstoffzellensysteme für die maritime Anwendung basieren in der Regel auf der PEM-Technologie (Polymerelektrolyt-Membran) und der SOFC-Technologie (Feststoffbrennstoffzelle), wobei auch DMFC’s (Direktmethanolbrennstoffzelle) verwendet werden, die dennoch nicht so stark für maritime Anwendungen vertreten sind:

Nr.	Hersteller	Leistung [kW]	Typ	Zertifizierung
1	Proton Motors	< 213	PEM	n.a.
2	Ballard Power Systems	200	PEM	DNV
3	Genevos Efficient Innovations	15 -40	PEM	LR
4	Teco Marine Fuell Cell	400	PEM	DNV (AiP)
5	Nedstack	550	PEM	n.a.
6	EKPO	<123	PEM	n.a.
7	Power Cellution	100	PEM	n.a.
8	Advent	15	HAT-PEM	n.a.
9	Bloom Energy	10 000	SOFC	DNV
10	Genevos	80	PEM	DNV

Tabelle 2: Verfügbarkeit von Brennstoffzellen für den maritimen Einsatz

Die Leistungsfähigkeit und der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen sind stark von den äußeren Randbedingungen der elektrochemischen Reaktion abhängig. Dabei sind die Art und Güte des Katalysators, die Art des Elektrolyten, sowie der Qualität des Wasserstoffs relevant. Für den Schiffseinsatz spielen vor allem Leistungsgewicht und -volumen eine wesentliche Rolle.

- **Analyse zu der Skalierbarkeit vorhandener Energieversorgungssysteme auf Schiffen und diesbezüglich gültiger Regelwerke**

Verbrennungsmotoren betrieben mit Diesel bzw. fossilen Brennstoffen sind Stand der Technik und Hauptbestandteil der vorhandenen Energieversorgungssysteme von Binnen- und Seeschiffen. Sowohl die IMO mit den festgelegten Standards in der MARPOL (Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe) als auch die Flaggenstaaten, in Deutschland das BSH (Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie) geben das gültige einzuhaltende Regelwerk zur Verschmutzung der Luft vor. Dort sind unteranderem die Grenzwerte für Schwefeloxide, Stickoxide und die Emission von Treibhausgasen vorgegeben.
Diese Vorgaben stellen hohe Anforderung an die Motorperipherie, wie eine SCR-Abgasnachbehandlung, Kraftstoff-Booster-Pumpen, Schmieröl-Seperatoren, Kompressoren und Kraftstoffaufbereitung, um diese Grenzwerte einzuhalten und gleichzeitig wirtschaftlich zu sein.
Im Zuge eine Neumotorisierung oder eines Retrofits erfüllen deshalb hybride Antriebskonzepte mit einem konventionellen Dieselmotor und einem Elektromotor diese Anforderungen kostengünstiger.
Ein Beispiel für die Umsetzung zeigt die Firma MAN, welche ein skalierbares hybrides Antriebskonzept auf ihrer bestehenden Motorenportfolio bis 2500 PS entwickelt hat.

- **Recherche zu gültigen Normen und Richtlinien bezüglich der Verwendung von H2 mittels Brennstoffzelle als Teil eines batterieelektrischen Energieversorgungssystems auf Schiffen**

Die Klassifikation und die technische Zulassung für ein Binnenschiff und dessen Systemkomponenten werden von den nationalen und internationalen Binnenschifffahrtsverordnungen, internationalen Normen durch die IMO und durch die Klasseregeln reglementiert. International existieren Richtlinien, die zur Schiffsausrüstung mit H2 betriebenen Brennstoffzellen als Teil eines batterieelektrischen Energieversorgungssystems herangezogen werden können. Die von der IMO (International Maritime Organisation) herausgegebene Richtlinie „International Code of Safety for Ship using Gases of Low-Flash-Point Fuels (IGF)" schreibt die Standards für Schiffe vor, die mit Brennstoffen, der einen Flammpunkt von weniger als 60°C aufweist, betrieben werden. Für die Regelungen lässt sich folgende „Hierarchie" darstellen:

Abbildung 1: Institutionelle Zusammenhänge zur Erstellung von Richtlinien und Auflagen für Schiffe

Dieser IGF-Code gilt für mit LNG, CNG und Methanol befeuerte Schiffe und kann in Ansätzen und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen stofflichen Eigenschaften auf Wasserstoff übertragen werden. Die Klassifikationsgesellschaften arbeiten an eigenen Regelwerken, um Sicherheitsstandards zu schaffen, die einen sicheren Betrieb mit Wasserstoff als maritimen Treibstoff gewährleisten.
Die Vorgaben für die technische Ausführung der Antriebs- und Energieversorgungssysteme von Schiffen und Offshore-Systemen sind in jeweiligen Klassenregeln festgelegt.
Beispielsweise beschreibt die "Rules of Classification- Ships Part 6 additional class notations Chapter 2

Propulsion, power generation and auxiliary systems" des DNV-GL die allgemeinen technischen und organisatorischen Anforderungen für Antriebs- und Energieversorgungssysteme der Seeschifffahrt vor. Hier werden unteranderen Vorgaben zum

- Sicherheitsmanagement,
- Integration und
- Explosionsschutz für den Bordeinsatz von Brennstoffzellen geregelt.

Zusätzlich werden in den Klasseregeln Prüfeigenschaften für den Einsatz auf seegehenden Schiffen, wie Verträglichkeit mit Salzhaltiger Luft, hoher Luftfeuchtigkeit, Vibrationen und Temperaturwechseln festgelegt. Das Regelwerk (DNV GL RU SHIP, Pt. 6, Ch. 2) definiert die Anforderungen an Brennstoffzellensysteme auf Schiffen in mehreren Abschnitten. Es behandelt die Klassifikation von Brennstoffen, Designprinzipien zur Sicherstellung der Systemstabilität und Notfallmaßnahmen, Materialanforderungen sowie die Anordnung und Sicherheitsanforderungen der Systemkomponenten an Bord. Zudem werden Brandschutzmaßnahmen, die Installation elektrischer Systeme, Sicherheits- und Monitoringsysteme sowie Anforderungen an Kompressorräume und Systemtests festgelegt.
Für alternative Klassifikationsgesellschaften besitzen für den Einsatz von Brennstoffzellen andere Klassenregeln:

- ABS - Fuell Cell Power Systems for Marine and Offshore Applications (Nov 2019)
- BV - NR 547 DT R01 E "Ships using Fuell Cells" (Jan 2022)
- KR - Guidance for Fuell Cell Systems on Board of Ships (2015)
- LR - LR Technical Requirements for Fuell cells in the marine environment – Performance and prescription (2006)

Die Einsatztauglichkeit muss zusätzlich mit diversen Tests nachgewiesen werden:

- Umwelttest (nach DNV GL CG 0339 Sec.3)
- Vibrationstests
- Neigungstest
- Salznebeltest
- Test der Temperaturbedingungen

Des Weiteren müssen auch die Regellungen der Flaggenstaaten berücksichtigt werden (Für Deutschland: IEC 62282-3-100 (Stationary fuel cell power systems- Safety), IEC 62282-2 (Fuel cell modules))

- **Recherche zu Normen und Richtlinien für integrale Lösungen zur Lagerung von verschiedenen H2-Energieträgern (genauer: H2 gasförmig unter Druck, H2 tief kalt verflüssigt, Ameisensäure, Metallhydrid, LOHC, Methanol und Ammoniak) auf Schiffen**

Für die Lagerung von verschiedenen H2-Energieträgern wie H2 gasförmig unter Druck, H2 tief kalt verflüssigt, Ameisensäure, Metallhydrid, LOHC, Methanol und Ammoniak auf Schiffen gelten spezielle Normen und Richtlinien, welche in der Regel strengere Vorgaben als die landseitige Lagerung beinhalten. Allgemein zu berücksichtigen sind in jedem Fall die technischen Regeln für Gefahrstoffe (z.B. TRGS 509 & 510), welche sich mit der Lagerung von Gefahrstoffen (sowohl ortsfest als auch ortsbeweglich und Lagerverträglichkeit) und dazugehörigen Füll- und Entleerstellen befasst. Für die einzelnen Stoffe sind unterschiedliche Vorschriften geltend, was wiederum abhängig von der Einstufung der Stoffe ist (z.B. Aggregatzustand, Gefahrenpotenzial, chemische Eigenschaften). Für den Einsatz einer Brennstoffzelle ist die „Herkunft" des Wasserstoffes und somit die Art des Kraftstoffes egal, solange dieser ausreichende Reinheit besitzt (egal ob zuvor umgeformt oder nicht).

Druckwasserstoff wird schiffsseitig in Druckbehältern (nach der DRGL/PED (Druckgeräterichtlinie)) in der Regel zwischen 250 und 700 bar gespeichert, wobei Verdichtung, Befüllung und Lagerung besondere Anforderungen an die Materialien, die Konstruktion sowie die Sicherheit stellen. Durch den negativen Joule-Thompson-Koeffizienten des Wasserstoffs kann es bei der Entspannung zu Erwärmung kommen, die bei hohem Druckgefälle und großen Volumen deshalb Füllprotokolle und ein Temperaturmanagement

erforderlich machen können, um die Erhöhung der Gastemperatur über den Betriebstemperaturen der Einsatzwerkstoffe der Tankleitung und des Speicherbehälters zu unterbinden. Zudem müssen Vorgaben für an Bord befindliche Druckgeräte (2010/35/EU, 2009/79/EU) und Explosionsschutzmaßnahmen gemäß EU-Richtlinien (2014/34/EU, ES-TRIN) sowie Klassifikationsvorgaben eingehalten werden, um eine sichere Speicherung an Bord zu gewährleisten.

Die kryogene Speicherung von Wasserstoff bei -253 °C erfordert hohen Energieaufwand und komplexe Technik, wobei zusätzlich zu den Anforderungen der Gas-Speicherung (durch ISO/TC 220 festgelegt) die Auswirkungen niedriger Temperaturen und der Boil-Off-Effekt berücksichtigt werden müssen, während der IGC-Code („Interim Recommendations for Carriage of liquefied Hydrogen in Bulk“) vorläufige Richtlinien für den Transport festlegt.
Aufgrund seiner Toxizität und Korrosivität erfordert die Lagerung von Ammoniak spezielle druck- und korrosionsbeständige Tanks sowie Sicherheitsmaßnahmen gemäß den Klassenregeln (vgl. DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch 2 Section 14). Die Metallhydridspeicherung von Wasserstoff führt durch anisotrope Gitterdehnung zu Materialspannungen und Rissen, wodurch spezielle Sicherheits- und Wartungsmaßnahmen erforderlich sind (vgl. ISO 16111), während gleichzeitig dieselben Richtlinien wie für gasförmige Wasserstoffspeicherung gelten.
Flüssige Energieträger die z.B. unter die LOHC fallen (Liquid Organic Hydrogen Carrier) besitzen wiederum nur wenige explizite Vorschriften und fallen zumeist unter Regularien für die spezifische Gefahrstofflagerung.
Methanol zählt zu den „low flashpoint fuels“ und unterliegt den IGF-Code/SOLAS-Vorschriften sowie zusätzlichen Regelungen für Alkohole. Unter anderem müssen Tanks als Explosionszone Stufe 1 gesichert werden, mit Gasdetektoren ausgestattet und gut belüftet sein, sowie Rohrleitungen doppelwandig mit Stickstoffisolierung ausgeführt werden. Auch hier finden sich zusätzliche Vorgaben durch die Klassifizierungsgesellschaften (vgl. DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Section 6)

Wesentlich für die Betrachtung eines H2-Systems ist u. a. der IMDG-Code (International Maritime Dangerous Goods Code), welcher sich mit der Handhabung von gefährlichen Gütern im maritimen Umfeld befasst und der IGF-Code (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels) welcher die rechtliche Grundlage für den Einsatz von alternativen Energieträgern in der Schifffahrt, wie z.B. Wasserstoff als Low-Flashpoint-Fuel, bildet. Trotz allem fehlen auch hier noch viele rechtliche Rahmenbedingungen, die sich zukünftig an den Regelungen für z.B. LNG basierte Schiffe orientieren sollen. Gerade die Einführung und Einordnung von neuen Energieträgern wie Ameisensäure in ein Regelwerk erscheint als eine sehr große Herausforderung, die nur von einer ressourcenstarken und gut vernetzten Interessenspartei umgesetzt werden kann (z.B. staatliche Interessen, militär).

- **Recherche und Analyse gültiger Normen und Richtlinien zum Betrieb und Inbetriebnahme von relevanten Nebensystemen zur H2-Versorgung von Schiffen hinsichtlich der verwendeten H2-Energieträger (genauer: H2-Konditionierung, chemische H2-Umwandlung, Abwasserverwendung)**

Für den Betrieb und die Inbetriebnahme von Nebensystemen zur H2-Versorgung von Schiffen sind eine umfangreiche Dokumentation und Zertifizierung erforderlich. Die relevanten Normen und Richtlinien sind beispielsweise in den Regellungen des DNV definiert (DNV-RU-SHIP Pt.6 Chapter 2 und DNV-RU-SHIP Pt.4 Chapter 6 bis 9) und betrachten dabei die antriebszugehörigen Komponenten, die Verbindungsleitungen (Druck- und Elektrisch) und alle weiteren Einzelsysteme (zur Bebunkern, zur Versorgung, zur Sicherheit, zur Kontrolle) die für den Wasserstoffbetrieb notwendig sind.
Wesentliche Vorgaben zur Minimierung der Explosionsgefahr sind, dass Wasserstoffsysteme möglichst isoliert werden (z. B. durch doppelwandige Rohrleitungen und separate Räumlichkeiten), gefährdete Bereiche ausreichend belüftet, sowie elektrische Systeme vermieden oder abgeschirmt werden müssen. Zudem sind spezielle Materialien zur Vermeidung von Leckagen zu verwenden, Sicherheits- und Monitoringsysteme für Gasdetektion, Brandbekämpfung und Notabschaltung regelmäßig zu testen und alle Anlagen mit automatischen sowie manuellen Notaus-Systemen auszustatten.

- **Recherche und Analyse zur Eignung verwendeter Einsatzwerkstoffe in H2-Prozessen und H2-Speicherung hinsichtlich der Verwendung auf Schiffen**

Für die Betrachtung der Werkstoffeignung sind die maritimen Randbedingungen auf einem Schiff zu berücksichtigen. Im maritimen Bereich ist im Gegensatz zu landseitigen Strukturen immer mit Wasserkontakt einzelner Komponenten zu rechnen. Dabei ist grundsätzlich die Art und Häufigkeit des Kontaktes (Süß- oder Salzwasser) und das korrosive Potenzial auf die verwendeten Materialien zu berücksichtigen. Weiter spielen Brandschutzvorschriften auf einem Schiff eine zentrale Rolle für die Sicherheit und sind für leicht entflammbare oder brandfördernde Materialien nur schwer zu erfüllen. Bei der Entwicklung oder Übertragung von neuen Konzepten muss grundsätzlich beachtet werden, dass auf einem Schiff installierte Systeme und Komponenten durch Wellen, Wind und Strömung immer in Bewegung sind. Dadurch müssen verwendet Materialien und Verbindungen ein Mindestmaß an Grundwechsellastfestigkeit des Werkstoffes mitbringen.
Die Eignung von Werkstoffen für wasserstoffbetriebene Systeme wird durch internationale Normen wie ISO 15649:2001 (Rohrleitungssysteme und Wasserstoffversprödung) sowie ISO 19880-3:2018 (Sicherheitsanforderungen für Ventile in Wasserstoff-Betankungssystemen) geregelt. Erfahrungen aus der Offshore-Öl- und Gasindustrie, insbesondere zur Korrosionsbeständigkeit und strukturellen Integrität, fließen in die Materialauswahl ein, wie es die ISO 21457 festlegt.
Für H2-Anlagentechnik im Hochseeeinsatz werden vor allem nichtrostende, tieftemperaturbeständige Stähle mit hoher Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung verwendet.
In der H_2-Speicherung variiert die Materialwahl je nach Druckspeichertyp:

- Typ I & II (Stahlflaschen, Stahlfaschen teilumwickelt): Cr-legierte Stähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt für hohe Druckfestigkeit.
- Typ III (vollumwickelte Metallflaschen): Aluminiumwerkstoffe für ein geringes Gewicht und gute Festigkeit.
- Typ IV (Composite-Druckbehälter): Kombination aus Composite-Materialien, thermoplastischen Polymeren und Metallanschlüssen für maximale Leichtbauvorteile.

Hierbei ist für die Druckbehälter für den Schiffsbetrieb im Gegensatz zu einem möglichen stationären Einsatz an Land, zusätzlich eine Betrachtung des Crash-Verhaltens notwendig, welches vor allem im Bereich der Composite-Materialen durch ihr Bruchverhalten für zusätzliche Gefährdung sorgen kann.

Die Werkstoffe müssen in Summe nicht nur wasserstoffkompatibel, sondern auch hoch korrosionsbeständig und mechanisch belastbar sein, um extremen Bedingungen wie Salzwasser, hohen mechanischen Schwingungsbelastungen und Temperaturschwankungen auf See standzuhalten. Während bereits viele etablierte Materialien verfügbar sind, müssen spezifische Anwendungen durch praxisnahe Testkampagnen weiter validiert werden.

- **Recherche und Analyse zur Beladungstechnik auf Schiffen für ein H2–Energieträger (genauer: H2 – gasförmig, H2 – tief kalt verflüssigt, Ameisensäure, LOHC, Methanol und Ammoniak)**

Die Beladung von Schiffen mit Wasserstoff-Energieträgern kann auf verschiedene Weise erfolgen, darunter die bereits etablierten Methoden „Ship-to-Ship“, „Truck-to-Ship“ und „Shore-to-Ship. Die spezifische Verladung der Kraftstoffe ist wie auch die Umwandlung und Nutzung abhängig von ihren Stoffeigenschaften.
Während für kryogenen Wasserstoff Technologien aus der LNG-Betankung angepasst werden können, erfordert die Nutzung von Druckwasserstoff eine Anpassung bestehender Tankstellensysteme (z. B. für Nutzfahrzeuge wie Busse) an den maritimen Einsatz (dort Betankung mit Druckstufen von 350 bis 700 bar). Methanol, LOHC und auch Ameisensäure sind bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck flüssig und können mit besonderer Berücksichtigung der Giftigkeit, oder Verätzungsgefahr, mit den herkömmlichen Standardverfahren ähnlich zu fossilen Kraftstoffen gehandhabt werden. Eine Ausnahme bildet Ammoniak welches nicht nur unter (wenn auch geringem) Druck, niedriger Temperatur und mit korrosionsbeständigen Leitungen, sondern auch durch seine Toxizität mit geschlossenen Transfersystemen übertragen werden muss.
Wesentlich für die Gestaltung der Bunkeranlagen ist dabei die Berücksichtigung allgemeiner Regularien:

- MARPOL (Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe)
- SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea)
- ATEX EU 2014/34 (Explosionsschutz)
- DGRL EU 2014/68 (Druckgeräterichtlinie – vor allem für Druckwasserstoff)

Diese definieren für die jeweiligen Energieträger spezifische Sicherheitsmaßnahmen, Protokolle und Abstände, die im Betrieb einzuhalten sind. Alternativ kann ein austauschbares Containersystem (Plug-and-Play) mit Containerkranen eingesetzt werden, das für verschiedene Energieträger geeignet ist.

- **Analyse von Gestaltungsmöglichkeiten einer möglichst kompakten und modular erweiterbaren H2 – Energieversorgung mit deren Einrichtungen zur H2 – Speicherung und Verladung auf Schiffen hinsichtlich verschiedener Brennstoffzellentypen**

Die Gestaltungsmöglichkeiten einer möglichst kompakten und modular erweiterbaren H2-Energieversorgung mit deren Einrichtungen zur H2-Speicherung und Verladung auf Schiffen hinsichtlich verschiedener Brennstoffzellentypen) können durch verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von Wasserstoffspeicher, Brennstoffzelle und Batterie betrachtet werden.
Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten, diese Technologien in Modulen zu gruppieren, wobei die Brennstoffzellen und Batterien (eventuell auch Speicher) eigene Managementsysteme haben, die aufeinander abgestimmt werden müssen.

1	Wasserstoffspeicher	Brennstoffzelle	Batterie	
2	Wasserstoffspeicher	Brennstoffzelle	Batterie	
3	Wasserstoffspeicher	Brennstoffzelle	Batterie	
4	Wasserstoffspeicher	Brennstoffzelle	Batterie	
5	Wasserstoffspeicher	Brennstoffzelle	Batterie	
6	Wasserstoffspeicher	Brennstoffzelle	Batterie	Energiemanagement

Tabelle 3: Mögliche Gruppierungen der Wasserstofftechnologien für wenig komplexe Schiffe, Farbliche Technologiegruppierung

- Kombination 1 bietet maximale Flexibilität ohne Modulbindung (unabhängige Skalierung und Steuerung), ideal für Spezial-, sehr große oder sehr kleine Schiffe, mit höheren Kosten und mehr Aufwand verbunden
- Kombination 2 besteht aus einem Speicher-BZ-Modul, das je nach Batteriegröße als Hauptversorgung, Notstrom oder „Range Extender“ dient, gibt aber die Speicherkapazität vor
- Kombination 3 umfasst ein Speicher-BZ-Batterie-Modul, das Schiffsdesign einschränkt, aber vielseitig einsetzbar ist und als standardisierte Lösung kosteneffizient sein muss
- Kombination 4 ist nicht sinnvoll, da eine Zusammenfassung zwei verschiedener Energieträger, die zusammen skaliert werden, wenig sinnvoll ist
- Kombination 5 definiert die Leistung durch den Hersteller, während die Reichweite durch die Speicherkapazität vom Kunden bestimmt wird und einen mittleren Freiheitsgrad bietet.
- Kombination 6 bietet alle Einheiten als ein skalierbares Modul mit Energiemanagement, welches durch einfache Fertigung und Skalierung zwar kosten- und betriebseffizient dargestellt, aber durch die nicht vorhandene Flexibilität des Gesamtmoduls nur sehr beschränkt eingesetzt werden kann

Bei allen Kombinationsmöglichkeiten ist die Art der Brennstoffzelle zu berücksichtigen. Im Schiffsbetrieb könnten vorrangig PEM und SOFC-Brennstoffzellen zum Einsatz kommen. Die PEM-Brennstoffzelle eignet sich im Schiffsbetrieb besser als die SOFC, da sie durch ihre niedrigere Betriebstemperatur (60–100°C vs. 600–1.000°C) schneller startfähig ist, kompakter gebaut werden kann und eine flexiblere

Leistungsanpassung ermöglicht, wodurch sie besonders für variable Lastanforderungen und den mobilen Einsatz auf Schiffen vorteilhaft ist. All diese Eigenschaften nehmen ebenfalls auf die Kombinationsmöglichkeiten von Brennstoffzelle, Wasserstoffspeicher und Batterie Einfluss.

- **Recherche und Analyse von Methoden zur Auslegung der Dauerfestigkeit von allen Verbindungselementen in den Technologiebereichen auf einem Schiff**

Zur Auslegung der Dauerfestigkeit von allen Verbindungselementen auf einem Schiff müssen sowohl neue als auch bestehende Bauteilgeometrien untersucht werden. Für neue Bauteile sind ingenieurwissenschaftliche Tests erforderlich, darunter Simulationstests mit analytischen Methoden oder numerischen Programmen, aber vor allem repräsentative maschinelle Tests. Bestehende Verbindungselemente können anhand von mathematischen Modellen der verschiedenen Normen für das spezielle Verbindungselement und den vorgesehenen Anwendungsfall auf ihre Dauerfestigkeit überprüft werden. Wichtig ist dabei eine standardisierte Verbindungstechnik und ein abgestimmtes Schnittstellenmanagement, insbesondere in der Gasversorgungstechnik, um die Anforderungen der Drucksicherheit, der dauerhaft technischen Dichtigkeit und Medienresistenz zu erfüllen. Geeignete Verbindungstechniken für die Wasserstoffversorgung an Bord sind Schweißverbindungen und diverse Schraubverbindungen, wobei für die Festigkeitsberechnungen die DIN 18800, DIN EN 1993, das AD 2000 Regelwerk für Schweißverbindungen und die DIN EN 1993-1-8 und der VDI 2230 Blatt 2 für Schraubverbindungen herangezogen werden können. Bei Schraubverbindungen muss auf die Dichtung geachtet werden, für die eine Auswahl an Spiral-Metalldichtungen, (Ummantelte) Wellmetalldichtungen und Weichstoffflachdichtungen zur Verfügung steht, die anhand von Richtlinien wie DIN EIN 1514 oder der DNV-RU-SHIP Pt.4 Ch.7 ausgewählt werden können.

AP 2 - Konzeption skalierbarer Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich des Typs und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme

Als Ressource im Arbeitspaket 2 kam die Zuarbeit durch einen Unterauftragnehmer, dem Fraunhofer IEE in Kassel (siehe Anlage), zum Tragen. Die Kooperation mit dem Institut konnte entsprechend der einzigartigen Expertise der Forschungseinrichtung genutzt werden, um eine Konzeption von Energiebereitstellungssystemen auf Basis von Wasserstoff und die maritime Anpassung dieser schiffsgestützten Systeme zu erarbeiten. Das Arbeitspaket gehört zur Konzeptionsphase des Teilprojekts 2.2.

- **Erstellung von Konzepten für ein skalierbares und individuelles Energieversorgungssystem mit Grundfließbildern zu Stoffen, elektrischer Energie und Wärme für verschiedene Brennstoffzellentypen und Energiebereitstellungssysteme**

Hierfür wurden sechs Konzepte erarbeitet. Das erste Konzept ist ein zu 100% batterieelektrisches Konzept. Dieses Konzept ist aufgrund seiner geringen Anzahl an benötigten Systemen das schlichteste. Ein weiteres Konzept basiert auf der Technologie der Dual-Fuel Generatoren. Dieses Konzept wird deshalb in Betracht gezogen, da die Technologie der Wasserstoffverbrenner momentan in der Entwicklung ist und Motoren für die Schifffahrt möglicherweise zukünftig weiterhin eine Schlüsseltechnologie darstellen. Für auf Brennstoffzellen basierende Konzepte wurden die Brennstoffzellen der Typen Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEM), Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC) und Festoxydbrennstoffzelle (SOFC) genutzt, wobei eine Kraftstoffbetrachtung bei den Brennstoffzellen zu einem Konzept geführt hat, bei dem die Kraftstoffauswahl keine Rolle spielt. Die Konzepte mit Brennstoffzellen und dem Dual-Fuel Motor sind komplexer gestallte, da die Anzahl an nötigen Subsystemen größer ist. Beispielhaft ist nachfolgend das Grundfließbild des PEM/All-Fuel-Systems dargestellt.

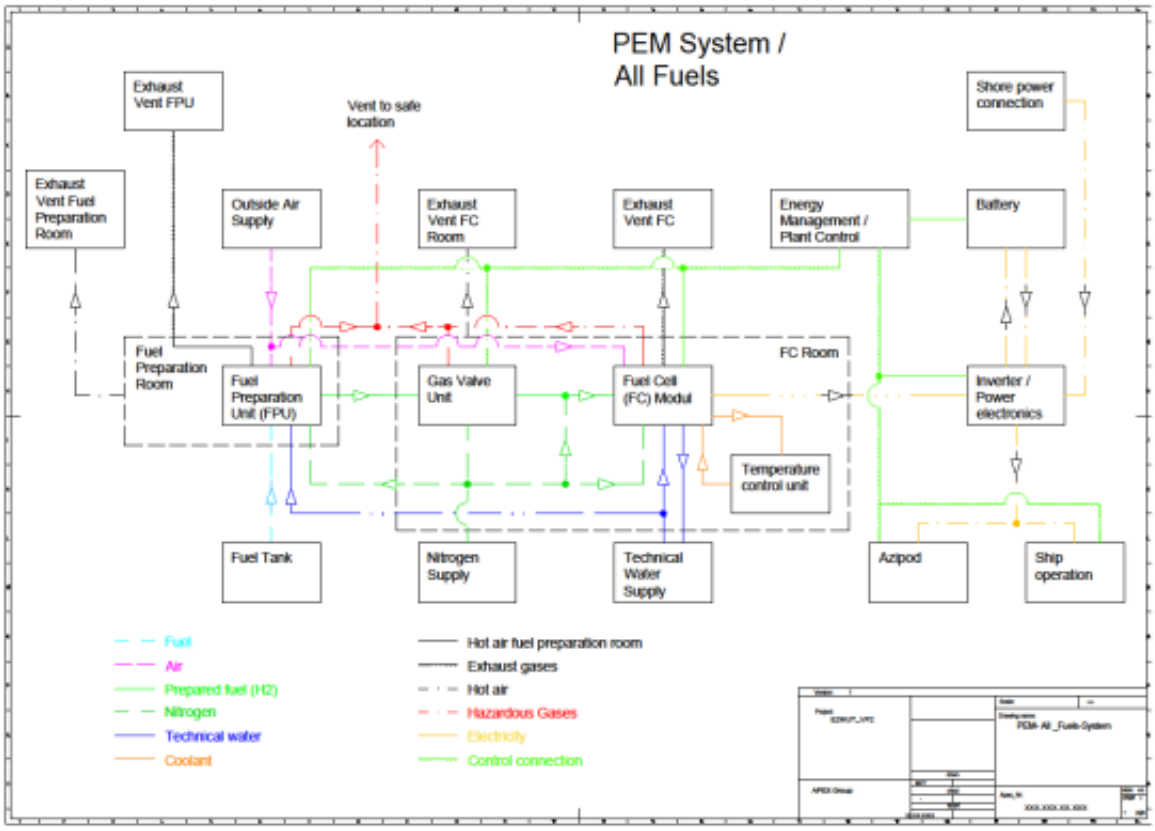


Abbildung 2: Kraftstoffunabhängiges PEM-System

- **Festlegung von Teilsystemgrenzen und Übergabepunkten**

Die Festlegung der Teilsystemgrenzen ergibt sich bei den verschiedenen Konzepten aus den Regelungen und Normen des ersten Arbeitspakets. Gemäß der ES-TRIN Anlage 8 werden mehrere Subsysteme durch die Systemgrenzen zusammengefasst und abgegrenzt. Es ist ersichtlich, dass für den Betrieb eines Systems auf der Grundlage von Wasserstoff oder Wasserstoffderivaten mindestens drei Räume erforderlich sind. Die Systemgrenzen dienen als Übergangspunkte von einem System zum anderen. Räumlich sind somit die Kraftstoffspeicher mit Kraftstoffaufbereitung, die Brennstoffzellen und die elektronischen Räume mit den Batterien voneinander zu trennen. Diese Trennung kann innerhalb eines Raumes durch eine Abgrenzung in speziellen Schränken erfolgen oder durch von Wänden bestimmten räumlichen Trennung. Nachfolgend sind die Systemgrenzen des zuvor gezeigten PEM-Systems dargestellt.

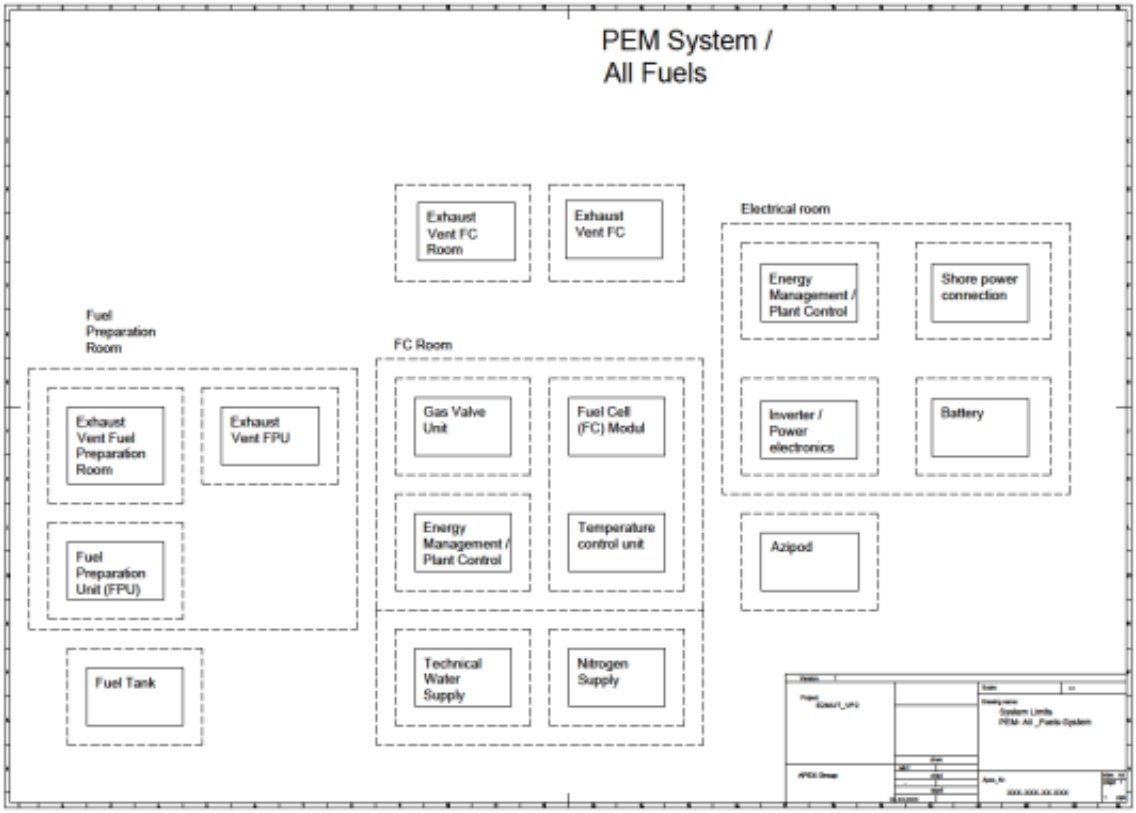


Abbildung 3: Systemgrenzen des PEM-Systems

- **Zusammenfassung der Systeme zu Modulen die beliebig skaliert werden können**

Für die Zusammenfassung von Systemen zu Modulen werden verschiedene mögliche Konfigurationen betrachtet und auf ihre Sinnhaftigkeit geprüft. Neben den bisherigen Modulkombinationen aus Speichersystem, Energiewandlungssystem und Zwischenspeichersystem wurde zusätzlich ein eigenständiges Steuermodul in Betracht gezogen, woraus sich 15 mögliche Konfigurationen, von denen folgende als sinnvoll angesehen werden können, untersucht wurden:

Konfiguration 1	Speichersys.	Energiewandlungssys.	Zwischenspeichersys.	Steuersys.
Konfiguration 2	Speichersys.	Energiewandlungssys.	Zwischenspeichersys.	Steuersys.
Konfiguration 5	Speichersys.	Energiewandlungssys.	Zwischenspeichersys.	Steuersys.
Konfiguration 9	Speichersys.	Energiewandlungssys.	Zwischenspeichersys.	Steuersys.

Tabelle 4: Sinnvolle Systemkonfigurationen zur Modulzusammenstellung

Konfiguration 1: Alle Module werden separat produziert, um Schiffe individuell anpassbar zu machen, wobei ein austauschbares Design verschiedene Nutzerprofile ermöglicht und das Steuersystem je nach Energiewandlungssystem neu konfiguriert werden muss.
Konfiguration 2: Das Speichersystem wird unabhängig installiert, während Energiewandlung und Zwischenspeicher als ein Modul geliefert werden, sodass die Reichweite flexibel bestimmt und Anfahrzeiten von Brennstoffzellen effizient überbrückt werden können.
Konfiguration 5: Ähnlich zu Konfiguration 2, aber die Steuereinheit ist in das Energiewandlungs- und Zwischenspeichermodul integriert, sodass eine direkte Kopplung mit der Bordelektronik ohne zusätzliche

Anpassung erforderlich ist.
Konfiguration 9: Kraftstoff- und Energiespeichersystem werden kombiniert, um die Reichweite zu optimieren, wobei das Modul auch Lastgänge und das Energiewandlungssystem berücksichtigen muss.

Zu beachten ist, dass die Systeme zur Erfüllung des Brandschutzstandards nach SOLAS-Vereinbarung (A60) durch Feuerschutzwände getrennt werden müssen, wobei Stahl- oder Containerwände ausreichen, aber ein Mindestabstand zwischen den Räumen (i.d.R. 6 m) eingehalten werden muss. Durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen könnten kompaktere Module zertifiziert werden, die alle erforderlichen technischen Systeme beherbergen, die aber das Volumen und Gewicht erhöhen und ein „Plug-and-Play"-System erschweren würden. Aufgrund unterschiedlicher Energieanforderungen sollte eine Aufteilung in mindestens drei Module erfolgen, während für standardisierte Schiffe ein 1-Modul-System denkbar wäre.

- **Erstellung von Konzepten für Beladungstechnologien hinsichtlich verschiedener H2–Energiespeichersysteme als modularer Teil des Gesamtsystems**

Für die Beladung der Schiffe mit Wasserstoff hinsichtlich der genutzten Energiespeichersysteme, festverbaute oder modular austauschbare Speichersysteme, können die Methoden aus der Recherche „Shore-to-Ship", „Truck-to-Ship" und „Shore-to-Ship" angewandt werden. Diese klassischen Bebunkerungsmethoden müssen zwar je nach Energieträger spezifische Sicherheitsanforderungen erfüllen, sind aber aktuell gängiger Standard und hinreichend bekannt.
Die Verladung von austauschbaren Wasserstoffspeichermodulen nach dem „Plug-and-Play"-Prinzip kann durch feste oder mobile Kräne erfolgen, wobei mobile Kräne eine flexiblere Nutzung an verschiedenen Kais ermöglichen. Hierfür ist eine modularisierte containerisierte Lösung von Vorteil, um bereits vorhandene Infrastruktur weiterhin nutzen zu können, standardisierte Prozesse zu ermöglichen und die Handhabung der Energiespeicher zu Erleichtern.
Für kryogenen Wasserstoff sind besonders temperaturbeständige Anschlüsse und Schläuche erforderlich, während Druckwasserstoff-Leitungen Überströmdrücken (i.d.R. bis zu 500 bar) standhalten müssen. Ammoniak erfordert korrosionsbeständige Leitungen, während Methanol mit minimalen Anpassungen bestehender Infrastrukturen genutzt werden kann.

Zusätzlich wurde ein Rampensystem für den Austausch von Containern in Betracht gezogen. Nach einer tieferen Analyse zusammen mit den Projektpartnern musste der Ansatz verworfen werden, da hier die Komplexität der Methode und die potenziellen Gefahren ein solches System nicht rechtfertigen.

- **Konzeption zu Verbindungsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Modulen**

Für die Verbindungsmöglichkeiten der Bauteile können die aktuell auf dem Markt verfügbaren Elemente eingesetzt werden. Werden die Module in containerisierter Form eingesetzt können diese über Schnellkupplungen an Deck und untereinander gesichert werden. Dafür sind standardisierte Lösungen wie ein Containereckenschnellverschluss (z.B. „Twist Locks") bereits am Markt erhältlich.
Ebenso verhält es sich für Rohrverbindungen, welche über metallische Schnell- oder Sicherungskupplungen zusammengeführt werden können. Komplementär dazu gibt es Stecker mit Schnellverschluss für die elektrische Energie- und Datenübertragung.

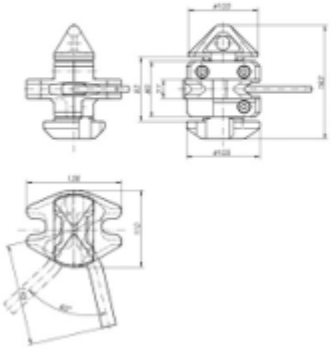
Containerecken -schnellverbinder [Quelle: globaltainer]	Hochdruckschnellverschluss für Wasserstoff [Quelle: stäubli]	Elektrische Schnellverbindung für maritime Umgebungen [Quelle: picclickimg]
		

Abbildung 4: Verbindungsmöglichkeiten zwischen den Modulen

AP 3 - Konzeption der skalierbaren Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich der Art der Betriebsszenarien

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Konzeption der Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich der Art der zuvor gewählten Betriebsszenarien. Das Arbeitspaket gehört zur Konzeptionsphase des Teilprojekts 2.2.

- **Erstellung von Konzepten zu verschiedenen Betriebsszenarien (genauer: Unterstützungsbetrieb / zuschaltbar, Grundversorgung / Dauerlauf, Nebenaggregate, Notlauf, Nachtsystem)**

Für die Konzeptionierung der Wasserstoffsysteme werden in einem ersten Schritt die Schiffstypen und Distanzen definiert, für die eine Wasserstoffbetrieb in Frage kommen. Es kann festgestellt werden, das vor allem Schiffe in Frage kommen, die Strecken fahren, auf denen ein Energiebedarf von zirka 12MWh gefordert wird. Besonders interessant für die Betrachtung sind Tank- und Passagierschiffe, da für diese die Sicherheitsanforderungen am umfassendsten sind. Aufbauend auf den Konzepten des AP 2.1 wird das Konzept basierend auf Wasserstoff als Kraftstoff und PEM-Brennstoffzellen als Energiewandler herangezogen.
Da die Erstellung der Konzepte bereits im vorangegangenen Arbeitspaket vorgenommen wurde, wird in diesem Arbeitspaket die getroffene Konzeptauswahl anhand der verschiedenen Szenarien näher beleuchtet. Dadurch, dass eine Vielzahl von Schiffsarten mit ihren unterschiedlichen Anwendungsbereichen und den dazugehörigen Betriebszuständen (Unterstützungsbetrieb / zuschaltbar, Grundversorgung / Dauerlauf, Nebenaggregate, Notlauf, Nachtsystem) zu einer zu großen Vielzahl von individuellen Betriebsszenarien führt, besteht die Strategie zur Konzepterstellung darin, sich auf die maximalen Betriebsdauern und Lastanforderungen der einzelnen Szenarien zu fokussieren. Hierfür werden für die konzeptionelle Auslegung der Wasserstoffsysteme in einem ersten Schritt die Schiffstypen (Passagier-, Güter-, Tankschiff, etc.; verschiedene Schiffslängen) und Distanzen ermittelt und tabellarisch organisiert, sowie damit verbundene Leistungen und Energiekapazitäten bestimmt. Eine daraus abgeleitete Auswahl des Antriebskonzepts nach den benötigen Anforderungen, sowie weitere Recherchen, führen zur Feststellung der Schiffstypen, welche für einen Wasserstoffbetrieb in Frage kommen.

Passagierschiff						
Tagesausflugsschiffe						
Länge	**Hauptantrieb 1h Kapazität**	**Hauptantrieb 3h Kapazität**	**Hauptantrieb 6h Kapazität**	**Hauptantrieb 12h Kapazität**	**Hauptantrieb 24h Kapazität**	**Hauptantrieb 36h Kapazität**
bis 25 m	Batterie	Batterie	Batterie	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ
25,01 - 40 m	Batterie	Batterie	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ
40,01 - 60 m	Batterie	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ
60,01 - 80 m	Batterie	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ
80,01 - 100 m	Batterie	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2 & PEM-BZ	H2-Derivat & PEM-BZ

Tabelle 5: Auszug aus Tabellen mit abgeleiteten Antriebskonzepten für verschiedene Schiffstypen

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Passagier- und Ausflugsschiffe (durch die umfassenden Sicherheitsanforderungen) besonders geeignet für die Umsetzung eines wasserstoffbasierten Antriebskonzeptes sind, um dieses Konzept im weiteren Verlauf auf Schiffe mit geringeren Ansprüchen für andere Schiffstypen adaptieren zu können. Als Ergebnis kann, festgestellt werden, das Schiffe, die Strecken fahren, auf denen ein Energiebedarf von circa 15 MWh bzw. 32 MWh besteht, am ehesten in Betracht gezogen werden können, um sie mit Wasserstoff zu betreiben (Anpassung in Absprache mit Projektpartnern).

- **Konzeption des Gesamtsystems in vorkonfektionierter Modulbauweise (Plug and Play am Aufstellungsort auf dem Schiff)**

Für die Konzeption der Gesamtsysteme wird eine Eingrenzung des Wasserstoffspeichersystems vorgenommen und über das Verbundprojekt gestreut von den jeweiligen Verbundpartnern bearbeitet. Grund hierfür ist die hohe Nachfrage der Projektpartner und die hausinterne Expertise zu den Wasserstoffdruckspeichersystemen (ebenfalls damit verbundenes Interesse an chemischer Speicherung). Das Konzept zur Druckwasserstoffspeicherung besteht aus Druckgasbehältern, welche in einer modularen und vorkonfektionierten Bauweise in „Racks“(Gestelle) organisiert sind. Diese Racks werden dann gestapelt („Stack“-Bauweise), in Speichercontainern eingebaut und mit einer Verrohrungstafel ausgestattet, die sie mit der Abnahme- oder Aufnahmestruktur verbindet. Das erste Konzept des so modellierten Ladesystems ist in den nachfolgenden Bildern dargestellt.
Für das Konzept der Verwendung von Druckwasserstoff wurden zwei Konzeptvarianten erstellt: Ein Druckwasserstoffmodul in einem 10 ft Container und eines in einem 20 ft Container, wobei beide Wasserstoffspeicher auf 500 bar Druck ausgerichtet sind. Die Module sind für circa 250 kg bzw. 500 kg Wasserstoff ausgelegt, die den zuvor benötigten kapazitiven Anforderungen entsprechen. In Gesprächen mit Projektpartnern konnten dafür erste Systemgrenzen (Speichercontainer eingebunden in Schiffssystem) und Übergabepunkte (Externe Anschlüsse an Container) definiert werden.

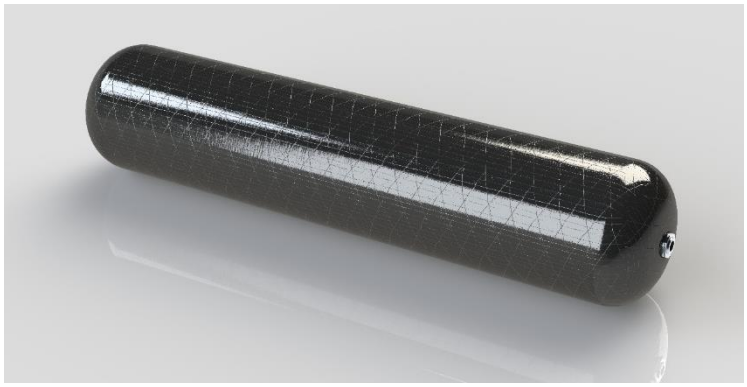


Abbildung 5: Hy-430-500 Wasserstoffdruckspeicherbehälter

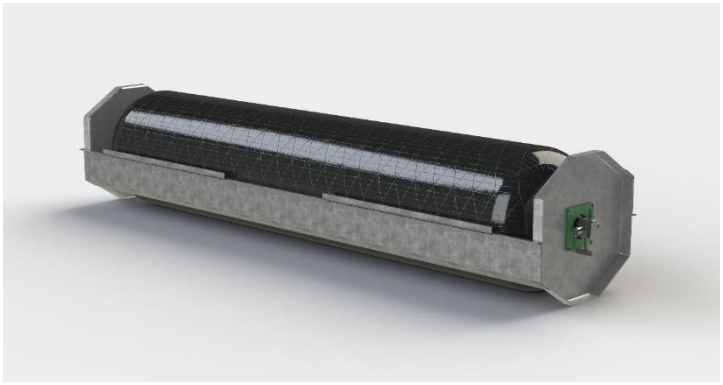


Abbildung 6: Wasserstoffdruckspeicherbehälter in Aufhängung ("Rack")

Abbildung 7: Mit Wasserstoffdruckspeicherbehältern ("Stacks") befüllter Wasserstoffcontainer

Die Speicherlösung (Flüssigspeichertank), die für alternative Konzepte erforderlich ist und dem aktuellen Stand der Technik entspricht (vergleichbar mit einem herkömmlichen Schiffsdieseltank), wird vorerst nicht weiter im Detail analysiert, da diese bereits Anwendungsreife besitzt.

- **Durchführung von Nutzwertanalyse zur Bewertung der erstellten Konzepte hinsichtlich technischer Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit des H2–Energiespeichersystems und der Möglichkeit diese Teilsysteme in skalierbaren Modulen zusammenzufassen**

Es wird eine Nutzwertanalyse mit verschiedenen Kriterien für 4 mögliche Speichersystemkonzepte durchgeführt. Hierbei wird nach der allgemeinen Kriteriumsauswahl eine Gewichtung festgelegt, die sich am vorliegenden Betriebsfall orientiert (maritimer Einsatz in einem Passagierschiff: Sicherheit der Passagiere und Gewichtseinsparung als Auswirkung auf Gesamtsystem im Fokus).

Kriterium / 0-4 Punkteskala	**Gewichtung**	**H2-Druckspeicher-container**		**H2-Druckspeicher-behälter**		**MeOH-Tank**		**NH_3-Tank**	
		Pkt.	**gew.Pkt.**	**Pkt.**	**gew.Pkt.**	**Pkt.**	**gew. Pkt.**	**Pkt.**	**gew. Pkt.**
Speicherkapazität	0,7	3	2,1	1	0,7	3	2,1	3	2,1
Energiedichte vol.	0,7	1	0,7	1	0,7	3	2,1	3	2,1
Gewicht	1	2	2	3	3	2	2	2	2
Sicherheit	1	4	4	4	4	4	4	3	3
Lebensdauer	0,5	3	1,5	2	1	4	2	2	1
Betriebstemperatur	0,3	4	1,2	4	1,2	4	1,2	4	1,2
Betankungs-/Befüllungszeit	0,7	3	2,1	3	2,1	3	2,1	3	2,1
Infrastruktur	0,7	1	0,7	1	0,7	2	1,4	2	1,4
Kosten	0,5	1	0,5	1	0,5	3	1,5	3	1,5
Umweltauswirkungen	0,5	2	1	2	1	3	1,5	1	0,5
Summe	**6,6**	**24**	**15,8**	**23**	**14,9**	**31**	**19,9**	**31**	**16,9**

Tabelle 6: Nutzwertanalyse Wasserstoffspeicherformen

Die Nutzwertanalyse zeigt nach der Gewichtung, dass Methanolspeicher (19,9) insgesamt besser abschneiden als Ammoniak- (16,9) und Wasserstoffspeicher (15,8 bzw. 14,9), vordergründig in den Kriterien Energiedichte, vorhandener Infrastruktur, Kosten und Umweltauswirkungen.
Hinsichtlich der Energiedichte werden der Methanol- und Ammoniaktank als gleichwertig eingestuft. Wasserstoffspeicher hingegen weisen eine geringere Energiedichte aufgrund der Eigenschaften des Wasserstoffmediums auf. Bei der Infrastruktur werden die Versorgungsmöglichkeiten für Methanol und Ammoniak ebenso gleichwertig bewertet, da beide Medien nicht nur einen etablierten Markt, sondern auch vorhandene Infrastrukturen aufweisen, die Infrastruktur für eine stabile Wasserstoffversorgung muss hingegen noch geschaffen werden. Aktuellen Berichten zufolge könnte eine spätere Neubewertung dieses Kriteriums zu einem deutlich positiven Ergebnis führen.
Die Kosten für Methanol- und Ammoniaktanks wurden wie die zuvor genannten Aspekte als gleichwertig beurteilt. Dabei handelt es sich um erprobte und bereits verfügbare Systeme, die aufgrund der verwendeten Materialien derzeit kostengünstig in der Anschaffung und Wartung sind. Wasserstoffspeicher hingegen befinden sich häufig noch in der Entwicklung und sind relativ neu auf dem Markt, wodurch noch keine kostensenkenden Effekte durch Massenproduktion erzielt werden. Zudem ist die Wartung eines Hightech-Behälters aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff deutlich aufwendiger als die eines Stahltanks. Aus diesen Gründen erhalten die Wasserstoffspeichersysteme erneut eine schlechtere Bewertung.
Hinsichtlich der Umweltauswirkungen wurde der Methanoltank als der beste bewertet, da er ohne großen Aufwand recycelt und wiederverwendet werden kann. Hochdruckwasserstoffspeicher aus Kohlenstofffaserverbundmaterialerhalten eine schlechtere Bewertung, da sie nicht einfach wiederverwendet werden können und derzeit hauptsächlich geschreddert im Asphalt recycelt werden können. Die Ammoniaktanks werden im Vergleich schlechter bewertet, da Ammoniak im Falle eines Lecks sehr umweltschädlich ist und der Tank ohne aufwändigere Vorbereitung nicht recycelt werden kann.
Im Hinblick auf die Sicherheit wurde der Ammoniaktank aufgrund des Mediums als einziger mit drei Punkten bewertet, da es schwieriger zu handhaben ist und spezielle Sicherheitsanforderungen für den

Umgang mit dem Tank und Ammoniak (auf Grund der Toxizität) erforderlich sind.

Es geht aus der Nutzwertanalyse hervor, dass alle Konzepte grundsätzlich umsetzbar sind und die Kosten nach Relativierung auf die Energiemenge und im Vergleich mit Speichersystemen für andere Energieträger zwar kostspieliger ausfallen, aber nach eigenen Abschätzungen zukünftig aufgrund der Technologieentwicklung und Skaleneffekte konkurrenzfähig sein werden.

- **Durchführung von Nutzwertanalyse zur Bewertung der erstellten Konzepte hinsichtlich technischer Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit der H2 – Brennstoffzellensysteme und der Möglichkeit diese Teilsysteme in skalierbaren Modulen zusammenzufassen**

Es wird eine Nutzwertanalyse mit verschiedenen Kriterien für 3 mögliche Brennstoffzellensystemkonzepte durchgeführt. Hierbei wird nach der allgemeinen Kriteriumsauswahl eine Gewichtung festgelegt, die sich am vorliegenden Betriebsfall orientiert (maritimer Einsatz in einem Passagierschiff: Sicherheit der Passagiere und Gewichtseinsparung als Auswirkung auf Gesamtsystem im Fokus).

Kriterium / 0-4 Punkteskala	**Gewichtung**	**Direktnutzung H_2 in PEM-Brennstoffzelle**		**Direktnutzung MeOH in Brennstoffzelle oder mit Reformer**		**Direktnutzung NH_3 in Brennstoffzelle oder mit Reformer**	
		Pkt.	**gew.Pkt.**	**Pkt.**	**gew.Pkt.**	**Pkt.**	**gew.Pkt.**
Energiedichte vol.	0,7	1	0,7	3	2,1	3	2,1
Gewicht	1	4	4	3	3	2	2
Bauraum	1	4	4	3	3	2	2
Sicherheit	1	3	3	2	2	1	1
Betriebstemperatur	0,7	4	2,8	3	2,1	2	1,4
Verfügbarkeit	0,7	2	1,4	4	2,8	3	2,1
Effizienz	0,7	4	2,8	3	2,1	4	2,8
Kosten	0,5	2	1	2	1	2	1
Umweltauswirkungen	0,5	4	2	2	1	3	1,5
Summe	**5,8**	**28**	**21,7**	**25**	**19,1**	**22**	**15,9**

Tabelle 7: Nutzwertanalyse Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellen

Der Vergleich der volumetrischen Energiedichte zeigt, dass diese bei Wasserstoff sehr niedrig ist, was große Speicher oder hohen Druck erforderlich macht. Methanol weist hier eine höhere Energiedichte auf, während Ammoniak die beste Energiedichte bietet.
Beim Gewicht und beim Bauraum ist die PEM-Brennstoffzelle für Wasserstoff die leichteste und platzeffizienteste Lösung (niedrige Temperaturen, kompakte Bauweise) da für eine DMFC (Direct-Methanol-Fuel-Cell) zusätzliche Komponenten benötigt werden (Flüssigkeitshandling, höhere Temperaturen) und die geringere Effizienz ein höheres Gewicht für die gleiche Leistung fordert. Am schlechtesten ist hier die SOFC-Brennstoffzelle (Solid-Oxide-Fuel-Cell), welche durch die hohen Einsatztemperaturen eine dicke und schwere Keramikisolierung benötigt.
In puncto Sicherheit bietet Wasserstoff durch bestehende Standards ein gut beherrschbares Sicherheitskonzept, hat aber eine hohe Explosionsgefahr. Methanol ist leicht entflammbar, aber einfacher zu handhaben als Wasserstoff, während Ammoniak durch seine Toxizität und hohe Gefährlichkeit die größten Sicherheitsrisiken mit sich bringt.

Die Betriebstemperatur ist bei einer PEM-Brennstoffzelle mit Wasserstoff (60–100°C) am niedrigsten, was eine schnelle Regelbarkeit ermöglicht. Methanol erfordert bei einer direkten Nutzung etwas höhere Temperaturen (60–120°C) oder einen Reformer (250–350°C), während Ammoniak als direkter Brennstoff nur in SOFCs (600–1.000°C) genutzt werden kann, die träge anlaufen.
Die Verfügbarkeit von Methanol ist am besten, da es weltweit verbreitet und einfach herzustellen ist, aber die Betrachtung der Komponentenverfügbarkeit weist Nachteile auf (siehe Fazit). Ammoniak ist ebenfalls gut verfügbar, hat aber eine schwächere Infrastruktur, während Wasserstoff derzeit noch eingeschränkt verfügbar ist.
In der Effizienz schneidet Wasserstoff mit 50–60 % in einer PEM-Brennstoffzelle am besten ab. Methanol erreicht in einer DMFC nur 30–40 %, kann aber durch einen Reformer in einer PEM-Brennstoffzelle auf 50–60 % gesteigert werden, während Ammoniak in einer SOFC auf etwa 50–60 % kommt.
Bezüglich der Kosten sind alle Systeme als gleichwertig zu betrachten. Obwohl die Kosten für Methanol hinsichtlich der Speicherung am geringsten sind (einfach zu lagern und zu transportieren), bedingt die etwaige Umwandlung vor der BZ oder die schwächere Leistung der DMFC, höhere Kosten für die gleiche Leistung. Ammoniak ist in der Lagerung günstiger als Wasserstoff, verursacht aber zusätzliche Kosten durch Sicherheitsmaßnahmen, während Wasserstoff durch die geringe vorhandene Infrastruktur, Speichertechnologie und die PEM-BZ vergleichbar hohe Kosten erzeugt.
Hinsichtlich der Umweltauswirkungen hat Wasserstoff den größten Vorteil, da er keine Emissionen verursacht und nur Wasserdampf als Abgas entsteht. Methanol setzt bei der Nutzung CO_2 frei, während Ammoniak bei direkter Nutzung zwar kein CO_2 erzeugt, aber durch seine toxische Handhabung ein höheres Risiko darstellt.

Resultierend zeigt die Nutzwertanalyse, dass die Direktnutzung von Wasserstoff in einer PEM-BZ als Bestes bewertet werden kann. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass MeOH und Ammoniak vorrangig durch die Einsatzfähigkeit der Technologie für maritime Anwendungen (schlechtere Leistungs-Charakteristika bezüglich des Gewichts und der Effizienz) und ihre Toxizität (explizit Ammoniak) als weniger geeignet eingestuft werden können. Zusätzlich sind passende Brennstoffzellen für MeOH zum aktuellen Zeitpunkt nach getätigter Recherche noch nicht in ausreichender Leistungsstufe am Markt verfügbar.

- **Abgleich mit Ergebnissen von NSD**

Beim Abgleich der Ergebnisse mit den in die Themen involvierten Partner, wurde den Nutzwertanalysen grundsätzlich zugestimmt. Weiter wird festgestellt, dass einige Punkte bei einer späteren Detailplanung vor einer Umsetzung neu bewertet werden könnten. So ist trotz der vergleichbar guten Sicherheitsbewertung des Ammoniaksystems hinsichtlich der Speicherung, eine Umsetzung bei Passagierschiffen ungewiss, da aktuelle Vorbehalte gegenüber Ammoniak durch Kunden existieren. Die noch nicht ausgereifte Technologie für die Abscheidung von Wasserstoff aus Ammoniak (weder an Land noch auf dem Schiff, nur herkömmlicher Einsatz im Verbrennungsmotor) ist ein zusätzlicher Grund, warum diese Form des Kraftstoffs im Projektverlauf nicht weiterverfolgt wird.
Grundsätzlich setzen Projektpartner auf Wasserstoff in umweltneutralen Energieerzeugungssystemen und stufen diese als technologisch fortschrittlicher als konkurrierende Kraftstoffarten ein. Dessen ungeachtet gibt es noch keine zertifizierten und erprobten austauschbaren Kraftstoffspeichermodule, was zu einem erheblichen Teil dem Mangel an Regeln und Zertifizierungsprozessen zugeschrieben wird. Speicherbehälterhersteller haben mit großen Unsicherheiten bei der Zulassung solcher Systeme zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu rechnen. Im Projekt hat sich aus diesem Umstand die Notwendigkeit ergeben, ein Treffen mit einer Schiffsklasse zur Aufklärung dieser Thematik durchzuführen.

Ein weiteres Ergebnis aus den Gesprächen mit den Partnern ist, dass der Einsatz von Methanol ebenfalls als wenig zukunftsorientiert betrachtet wird, da dessen gesamte Produktionsprozesskette zum aktuellen Zeitpunkt ineffizient ist und die Aussicht auf eine Produktion zum Zweck der Nutzung als maritimer Energieträger nicht nachhaltig einzustufen ist. Ohne eine Kopplung mit anderen Industrien und die Skaleneffekte daraus ist es schwer, eine ökonomische Produktion grün zu gestalten. Dies liegt zu einem großen Teil an den noch nicht ausgereiften und schwer umsetzbaren Kohlenstoffabscheidungsmethoden,

die es dafür benötigt. Diese werden rein thermodynamisch auch in Zukunft aufgrund ihrer geringen Effizienz keine hohe Wirksamkeit aufweisen, wodurch Betreiber wahrscheinlich eher auf Methoden des "Greenwashing" zurückgreifen werden, um ihre Schiffe betreiben zu können. Dies widerspricht den Kernzielen eines nachhaltigen Energiekonzeptes für den maritimen Einsatz, was einen wesentlichen Einfluss auf die nachfolgende Konzeptauswahl hat.

- **Auswahl von zwei leistungsfähigen Konzepten**

Für den weiteren Projektverlauf werden auf Grund der Erkenntnisse 2 Konzepte ausgewählt: Konzept 1 basiert auf Druckwasserstoff als Kraftstoff und PEM-Brennstoffzellen als Energiewandler, Konzept 2 beruht auf Methanol als Energieträger und der Verwendung einer Methanolbrennstoffzelle als Energieumwandler bzw. dem Einsatz eines Reformers (Erzeugung von Wasserstoff als Kraftstoff und Verwendung einer PEM-Brennstoffzelle).
Trotz der näheren Betrachtung beider Konzepte im weiteren Projektverlauf, liegt die klare Favorisierung und der Fokus auf Konzept 1 (siehe vorheriger Arbeitspunkt bezüglich des Zukunftspotenziales und der Abstimmung mit den Projektpartnern), weshalb dieses vor allem im Rahmen der anstehenden Simulationen alleinig betrachtet wird.

AP 4 - Entwicklung einer Simulationslösung für skalierbare Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich des Typs und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Entwicklung und Simulation der Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich der Art der zuvor gewählten Betriebsszenarien, sowie des Typs und der Art der dezentralen Energiebereitstellung. Das Arbeitspaket gehört zur Entwicklungsphase des Teilprojekts 2.2.

- **Entwicklung und Aufbau eines Simulationstools in Matlab / Simulink zur Entwicklung von Konfigurationsoptionen auf Grundlage von verschiedenen Anwendungsszenarien auf einem Schiff**

Die Entwicklung und Einrichtung des Simulationstools zur Konzeptentwicklung im Teilprojekt 2.2, wurde zunächst in MATLAB/Simulink aufgebaut und anschließend mit einem neuen Simulationsgerüst auf Python weiterentwickelt bzw. umgestellt. Dieser strategische Wechsel wurde von mehreren Faktoren beeinflusst, die die Funktionalität des Tools verbessern und mit den allgemeinen Projektzielen übereinstimmen. Ausschlaggebend für diesen Wechsel waren vor allem die höhere Leistungsfähigkeit, die größere Flexibilität, die besseren Datenanalysefunktionen und die solide Unterstützung durch die umfangreiche Open-Source-Gemeinschaft, die mit Python verbunden ist. Dieser Wechsel erfolgte unabhängig von den spezifischen Anforderungen des E2MUT-Projekts und spiegelt einen proaktiven Ansatz zur Nutzung fortschrittlicher technologischer Lösungen zur Verbesserung der Effizienz und Effektivität der Simulation wider.

Im Simulationstool sind wichtige Komponenten wie Batterien, Entsalzungstechnologie, Brennstoffzellen und Wasserstoffdruckbehälter integriert. Systeme und Prozesse können frei entsprechend der benötigten Detailierung Entworfen werden und physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften abbilden. Diese Komponenten sind unerlässlich für die Simulation von maritimen Operationen, die verschiedene Energiebedürfnisse und Umweltaspekte berücksichtigen. Durch die Integration dieser Elemente ist das Simulationstool in der Lage, Schiffe effektiv zu simulieren. Voraussetzung dafür ist, dass die Betriebsgrenzen und -parameter klar definiert und festgelegt werden.

- **Durchführung abgestimmter Simulationen nach Lastgang Strom / Wärme -> H2 Verbrauch und H2 – Verfügbarkeit (H2 - Vorrat) auf dem Schiff**

Es werden Simulationen für das von Tamsen Maritim konzeptionierte schnelle Städteshuttle, welches für die Strecke von Rostock nach Kopenhagen und zurück ausgelegt ist und welches ein Wasserstoffenergiebereitstellungssystem nach dem Konzept 1 verwenden soll, durchgeführt. Im ersten Schritt konnte eine Vielzahl verschiedener Lastgänge untersucht werden (in Zusammenarbeit mit Tamsen

Maritim, insgesamt 11 betrachtet: 1 idealer, 5 für Binnengewässer, 5 für offene Gewässer oder Flüsse).

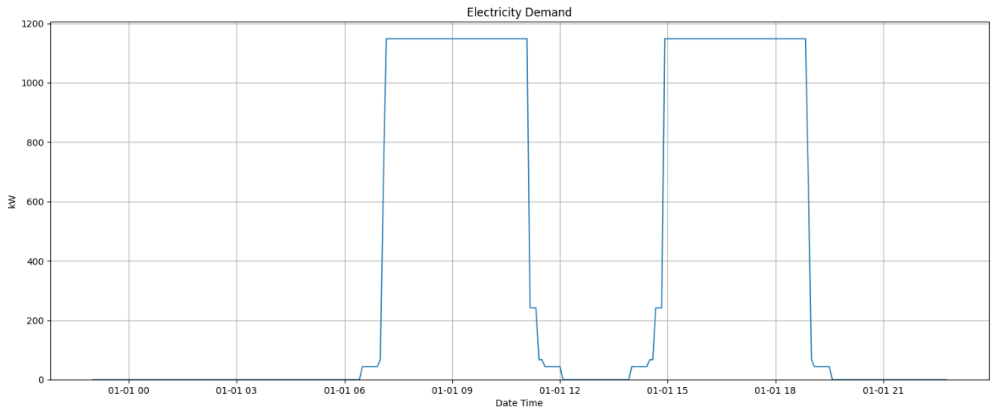


Abbildung 8: Beispiel für Strombedarf bei idealisiertem Lastgang (Sea_case_N)

Aus den Simulationen resultiert eine große Datenmenge, welche exaktere Abschätzungen der benötigten Energiemenge und der daraus resultierenden Masse an Wasserstoff ermöglicht. Um die benötigte Batteriemenge zu bestimmen, werden im weiteren Verlauf zwei explizite Szenarien betrachtet, deren Simulation eine Bestimmung der Kapazität der im Konzept eingesetzten Pufferbatterie erlaubt:

- Szenario 1 (S_Sea_Case_R-P_20%10_0):
  - Hinfahrt: Maximal 20% höherer Energieverbrauch
  - Rückfahrt: Bis zu 10% weniger Energieverbrauch
  - Abweichung von den Maximalwerten beträgt bis zu 10%
- Szenario 2 (S_Sea_Case_R-P_20%10_9):
  - Hinfahrt: Maximal 20% höherer Energieverbrauch
  - Rückfahrt: Bis zu 10% weniger Energieverbrauch
  - Abweichung von den Maximalwerten beträgt bis zu 1%

Um die optimale Batterie-Kapazität für das festgelegt System und dessen Grenzen (500 bar Druckspeicher, 500 kWh Batteriekapazität, 1200 kW Brennstoffzellen) zu ermitteln, wird die Simulation iterativ durchgeführt, wobei die Batteriekapazität kontinuierlich angepasst wird.
Die Ergebnisse zeigen, dass im ersten Szenario eine Batterie-Kapazität von mindestens 600 kWh benötigt wird, während es im zweiten Szenario 800 kWh sind. Aufgrund des extremen Charakters des zweiten Szenarios wird empfohlen, eine Batterie mit einer Kapazität von 800 kWh einzubauen, um das Städte-Shuttle angemessen darauf vorzubereiten.

- **Abstimmung der H2 – Systemkomponenten hinsichtlich einer gewählten Komponentenauslastung, Betriebsstunden und Justierung im Programm**

In der Simulation sind die Leistungsparameter der Brennstoffzelle und die Lade- und Entladekapazitäten der Batterie steuerbar und werden zur Parametervariation und Optimierung angepasst. Es zeigt sich, dass eine Leistungssteigerung der Brennstoffzelle um 50 kW ermöglicht, die Batteriekapazität auf 550 kWh zu reduzieren und dennoch die Anforderungen des Szenarios 2 (S_Sea_Case_R-P_20%10_9) zu erfüllen.

- **Auswertung der Simulation und Ermittlung der Korrelation von Einflussparametern auf die Gesamtkonzeption**

Die Eingangsparameter der Simulation beinhalten das Energieprofil, die Batterie (-kapazität, -typ, C-Rate, Lade- und Entladetiefe), die Hafenladestruktur, die Brennstoffzellendaten (Leistung, Menge, Auslastung, Betriebstemperatur und -druck), sowie die Wasserstoffspeicherdaten (Volumen und Druckbereiche). Die Auslegung von Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicherbehältern hat großen Einfluss auf die Systemeffizienz und Reichweite, wobei die Brennstoffzelle bis zu 100% des Lastprofils bedienen kann.
Die Größe der Brennstoffzelle wird durch die maximale Auslastung, die Betriebstemperatur, der

Betriebsdruck, sowie die Effizienz bestimmt. Der Wasserstoffspeicher beeinflusst die Reichweite, welche die gewählte Brennstoffzelle innerhalb des Lastprofils erreichen kann.
Die Batterie trägt zur Autarkie des Systems bei, indem sie Leistungsspitzen abfängt und langfristige Überlast ausgleicht, was die benötigte Batteriekapazität bestimmt. Die Wiederaufladbarkeit von Batterie und Wasserstoffspeicher während Betriebspausen beeinflusst die Dimensionierung dieser Komponenten. Nachfolgend ist ein beispielhafter Auszug aus den Simulationen dargestellt, der einige der Szenarien und darin enthaltene Parameter zeigt.

Sea-Case	BZ-Anzahl [u]	BZ-Leistung [kW]	BZ-Auslastung [%]	Batterie-kapazität [kWh]	Batterie-entlade-grenze [%]	C-Rate	H2-Speicher-größe [m³]	Energy-Balance	Min. Batterie-füllstand [kWh]	Min. H2 Füllstand [kg]
Sea_Case_R-P_20%10_9	6	200	100	850	10	2,6	15,98	O	110	180
Sea_Case_R-P_20%10_9	6	200	100	800	10	2,6	15,98	O	110	180
Sea_Case_R-P_20%10_0	6	200	100	600	10	2,6	15,98	O	90	180
Sea_Case_R-P_20%10_0	6	200	100	500	10	2,6	15,98	X	45	180
Sea_Case_R-P_20%10_9	8	200	85	50	10	2,6	15,98	O	33	155

Tabelle 8: Beispielhafte Auswertungstabelle der Simulation

Im Verlauf der Simulationen gelingt es, die entscheidenden Beziehungen zwischen Eingangsparametern (Anforderungen an das schiffsseitige Energiebereitstellungssystem) und deren Auswirkungen auf das System (Komponentendimensionen) zu bestimmen, was eine Optimierung der Systemkonfiguration durch Simulation ermöglichen kann. Die Konfigurierbarkeit der einzelnen Anlagenmodule (Wasserstoffspeicher, Brennstoffzelle) erlaubt die weitere Anpassung der Komponentendimensionen hinsichtlich der Systemanforderungen, woraus sich ergibt, dass das Konzept, sofern die Komponenten mit diesen Parametern am Markt verfügbar sind, auch real umsetzbar ist.
Zu erwähnen ist, dass die Güte der Auslegung und Simulation komplexer Systeme vor allem dadurch gefördert werden können, wenn weitere Parameter eingebracht und präzisiert werden. Hierfür ist es notwendig reale Daten einzubeziehen. Die Untersuchung anderer Schiffstypen, abweichend von den Anforderungen an das Energiebereitstellungssystem des schnellen Städteshuttles, erhöht die Genauigkeit und validiert in Teilen Simulationsergebnisse.

AP 5 - Entwicklung skalierbarer Wasserstoffenergiesysteme nach deren Typ und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Entwicklung der Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich des Typs und der Art des dezentralen Energiebereitstellungssystems unter besonderer Betrachtung der Skalierbarkeit. Das Arbeitspaket gehört zur Entwicklungsphase des Teilprojekts 2.2.

- **Entwicklung der zwei ausgewählten dezentralen und individuell modular erweiterbaren, sowie skalierbaren Wasserstoffenergiesysteme, sowie deren Ladetechnologie (schiffsseitig)**

Die ausgewählten Konzepte werden in diesem Abschnitt des Projektes detailliert betrachtet, verwendbare Realkomponenten von gängigen Herstellern ermittelt, sowie eine exakte Dimensionierung der Anlagenkonfiguration für eine mögliche Umsetzung des Konzept 1 am Beispiel des schnellen Städteshuttles vorgenommen.
Im Rahmen des Projektes konnte in Kooperation mit Tamsen Maritim eine HAZID-Studie durchgeführt werden, um das Gesamtkonzept sicherheitstechnisch zu bewerten und einen sicheren Betrieb durch daraus resultierende Maßnahmen gewährleisten zu können. Die HAZID Studie hilft wichtige Systemschnittstellen festzulegen und fehlende Standards zu ermitteln. Ein Besuch bei Lloyds Register unterstützte dabei, vor allem in Bezug auf die Betrachtung notwendiger zusätzlicher Schiffsaggregate (z.B. Brandschutzanlage), Anforderungen für eine spätere Zertifizierung des Gesamtsystems zu betrachten und zu berücksichtigen.

Das entwickelte Wasserstoffenergiesystem 1 (Konzept 1: Wasserstoff als Kraftstoff und PEM-Brennstoffzellen als Energiewandler) besteht aus zwei austauschbaren an Deck stehenden 10 ft-Speichercontainern (mit einzelnen Druckgasbehältern), welche gasförmigen Druckwasserstoff bereitstellen. Dieser speist durch eine geregelte Niederdruckleitung (<10 bar) die PEM-Brennstoffzellen im Schiffsinnern zur Erzeugung der benötigten elektrischen Leistung. Hierfür wurde die benötigte Ladetechnologie im Rahmen der „Plug-and-Play“ Methodik näher betrachtet und erste Prozessabschätzungen, sowie Simulationen zu Betankungsvorgängen durchgeführt, welche die Verwendung der „Plug-and-Play“ Methodik für bestimmte Anwendungsfälle (mit kurzen Vorgangszeiten) rechtfertigen.

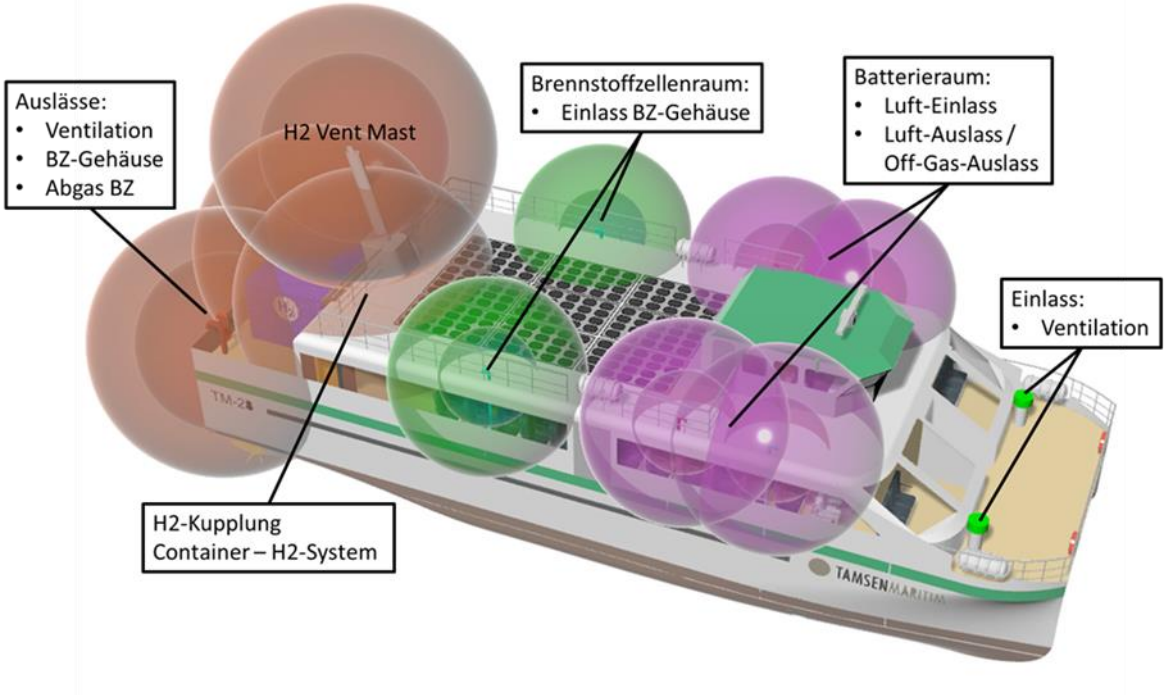


Abbildung 9: Gefährdungsbereiche am schnellen Städteshuttle - Auszug aus der HAZID Studie [Quelle: Tamsen Maritim]

Eine genauere Betrachtung des zweiten Wasserstoffenergiesystem (Konzept 2: Methanol-Speichertank mit Brennstoffzelle/Reformer), ergibt das für dieses keine ausreichenden maritim einsetzbaren Systemkomponenten am Markt verfügbar sind, was eine Realisierung nach dem aktuellen Stand der Technik verhindert. Dies liegt vor allem an der begrenzten Leistung der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle, welche im Vergleich zur Reinwasserstoffbrennstoffzelle (i.d.R. PEM) sehr niedrig ausfällt (DM-BZ: max. 25 kW; H2-BZ: >200 kW). Es zeigt sich, dass die alternative Verwendung eines Reformers, durch seine hohe Masse und die verringernde Effizienz, keine Möglichkeit darstellt, um die benötigten Energieanforderungen des vorliegenden realen Anwendungsfalls des schnellen Städteshuttles umzusetzen. Das Konzept wird für den nachfolgenden Projektverlauf nicht vollständig verworfen, aber für den vorliegenden Anwendungsfall auch nicht weiter betrachtet.
Weiterhin besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Feststoffenergieträgers auf Wasserstoffbasis, welcher auf Grund der Tatsache, dass dies noch Gegenstand aktueller Forschung ist, für die Konzeptentwicklung in E2MUT zunächst nicht tiefergehend betrachtet wird. Trotzdem sollte deren Nutzung als Flüssigenergieträger (z.B. als gelöste Salze der Ameisensäure) auf Grund des hohen Potenzials nicht an Aufmerksamkeit verlieren und für weitere Folgeprojekte in Betracht gezogen werden.

- **Festlegung der nicht standardisierten Bestandteile**

Bereits etablierte Standards im Bereich Wasserstoffsysteme für die Schifffahrt betreffen insbesondere zertifizierte und maritim einsetzbare Brennstoffzellen sowie die dazugehörige Infrastruktur, darunter Wasserstoff- und Methanoltankstellen.
Im Gegensatz dazu existieren für die Speicherung von Wasserstoff an Bord noch keine einheitlichen

Standards. Dies betrifft sowohl Druckwasserstoffspeicher als auch alternative Speichermethoden. Zwar sind die technologischen Grundlagen für diese Speichersysteme vorhanden, sodass deren konzeptionelle Integration aus technischer Sicht realisierbar ist, es fehlen regulatorische Vorgaben, die einen standardisierten und flächendeckenden Einsatz ermöglichen würden. Auch einige sehr alte Verfahrensgrundsätze bei der Klassifizierung von Schiffen stehen modernen Zulassungskonzepten, die aus anderen industriellen Bereichen übernommen werden könnten, entgegen. So muss ein Tanksystem immer als Teil des Schiffes betrachtet werden, wodurch der Einsatz von austauschbaren Systemen erschwert wird. Auch die Forderung die komplette Supply Chain zu auditieren ist bei neuen Werkstoffen wie Verbundmaterialen schwierig und muss in den angepassten Regularien berücksichtigt werden. Im Rahmen des Projekts fand ein Treffen mit Lloyd's Register (LR) statt, das einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand der erforderlichen Regularien ermöglichte. Derzeit wird ein Entwurf für die Zertifizierung erarbeitet, der sich an bestehenden Standards für vergleichbare Systeme, wie etwa LNG gemäß dem IGF-Code, oder der EN 17339 für Druckbehälter, orientiert. Dabei soll darauf geachtet werden, die spezifischen Unterschiede zwischen den Technologien angemessen zu berücksichtigen.
Laut Lloyd's Register (LR) besteht eine wesentliche Herausforderung darin, dass bislang nur wenige Produkte von Herstellern auf den Markt gebracht werden. Dies liegt daran, dass es noch keine festgelegten Rahmenbedingungen für die Zertifizierung gibt, wodurch Hersteller das Risiko vermeiden möchten, mit ihren Produkten nachträglich nicht den Anforderungen zu entsprechen. Gleichzeitig gestaltet sich die Definition von Zertifizierungsvorgaben für Wasserstoffsysteme für sämtliche Schiffsklassen schwierig, solange keine industriellen Vor-Standards existieren, an denen sich diese orientieren können. Daher sind sowohl die Industrie als auch die Zertifizierungsstellen derzeit auf eine enge Zusammenarbeit angewiesen. Erste Einzelzulassungen auf Basis von Risikoabschätzungen konnten bereits erfolgen. In diesem Zusammenhang steht auch APEX im Austausch mit LR, das als Teil der deutschen Delegation im CESNI-Gremium an der Entwicklung regulatorischer Vorgaben mitwirkt. Ziel ist es, die Weiterentwicklung der ES-TRIN (Technische Anforderungen an Binnenschiffe) im Bereich der Wasserstofftechnologien aktiv zu begleiten – ein Teilerfolg des Projekts.

- **Entwicklung eines Fertigungsprozesses zur Herstellung verschiedener Teilsysteme in vorkonfektionierten Modulen**

Beim vorliegenden Konzept kann das beschriebene System in zwei Hauptkomponenten unterteilt werden, die standardisierte Modularität ermöglichen und deren Fertigung vor Installation (Herstellung des Gesamtsystems) durchgeführt werden muss. Die erste Hauptkomponente ist die Wasserstoffspeichereinheit, welche den Gasspeichercontainer mit integrierter oder nachgeschalteter Gaspräparation, sowie eine Förderungsschnittstelle beinhaltet. Die Verbindung zur zweiten Haupteinheit, der Verarbeitungs-/Umwandlungseinheit (Brennstoffzellen) findet durch verschiedene Leitungen statt, die für jedes ausgelegte System, auf Grund der individuellen Geometrie des Einsatzortes/Schiffes, spezifisch angepasst werden müssen.
Die Herstellung des Gasspeichercontainers, der aus mehreren Typ-IV Druckgasspeichern bestehen soll, umfasst mehrere Fertigungsschritte, beginnend mit der Produktion der Einzelbehälter, welche folgende wesentliche Schritte beinhaltet:

- Fertigung von metallischen Anschlusstücken (Bosse)
- Herstellung einer zum Linermaterial haftvermittelnden Bossoberfläche (durch z.B. Beschichtung)
- Herstellen des Liners mit Bossen (durch z.B. Rotationsformen)
- Umwicklung des Liners mit Kohlenstofffasern (Fertigung der Armierung) und Aushärtung

Abschließend werden die Behälter zusammen mit den Anschlussleitungen und benötigten Gasinstrumenten in einem Rahmengestell montiert, welches zum Schutz und zur einfacheren Handhabung in einem Überseecontainer eingebracht werden kann (Fertigstellung des Speichercontainers). Hierbei ist zu beachten das viele der Prozessschritte automatisierbar sind, was durch eine Standardisierung der Komponenten begünstigt wird.
Die Herstellung der Brennstoffzelle muss nachfolgend nicht nochmal genauer betrachtet werden, da diese

bereits als standardisierte Komponente am Markt verfügbar ist und auch bereits für maritime Anwendungen von mehreren Herstellern zugelassen wurde. Nichtsdestotrotz gibt es hier die Möglichkeit die verwendeten Brennstoffzellen auf Rahmengestellen zu montieren, was wiederum sowohl die Installation als auch die Skalierbarkeit des Systems durch standardisierte Prozesse und Größen vereinfacht.

- **Auswahl von Systembestandteilen und zugehörigen Nebensystemkombinationen**

Für die Auswahl der geeigneten Systembestandteile im finalen Konzept mit den dazugehörigen Nebensystemkombinationen sind drei Aspekte von zentraler Bedeutung: die Auswahl geeigneter Technologien, die modulare Integration und die Simulation und Bewertung.
Für die Technologieauswahl beim Betrieb von verschiedenen Schiffstypen mit wasserstoffbasierten Energieträgern liegt nach vorheriger Betrachtung in Nutzwertanalysen, der Fokus auf der Direktverwendung von Druckwasserstoff. Die Nutzung von diesem, wird im Gegensatz zum Einsatz von Methanol oder Ammoniak aktuell von Werften und Verbrauchern favorisiert. Dies liegt nicht nur am Effizienzvorteil der benötigten Brennstoffzellentechnologie, welche für den Schiffsbetrieb auf engem Raum, geringem Gewicht und hohen Leistungsanforderungen ideale Voraussetzungen bereithält, sondern auch an den Sicherheitsbedenken der alternativen Kraftstoffe (vorrangig Ammoniak). Von Nachteil ist die mangelnde Infrastruktur, welche sich für grünen Wasserstoff aber zukünftig positiv entwickeln sollte.
Zentrale Module des Energiebereitstellungssystem sind das Speichersystem (Wasserstoffspeicherung), das Energieumwandlungssystem (Brennstoffzelle), das Zwischenspeichersystem (Pufferbatterie) und das Steuersystem. Nebensysteme die für den Betrieb des gesamten Energiebereitstellungssystem notwendig sind stellen vor allem die Sicherheitssysteme, die Transfersysteme (Kraftstoff- und Energieübertragung) und die Be-/Entlüftungssysteme dar.
Für die modulare Integration aller Systeme und für die Konzepte resultierende Kombinationen ist es wichtig, dass die Systeme modular erweiterbar sind. Einzelne Bestandteile und Kernkomponenten der Systeme müssen so gewählt werden, dass eine Skalierung oder Anpassung an verschiedene Schiffsgrößen möglich ist. Explizit sollten hierbei Leistungsanforderungen und bauliche Anforderungen (Größe und Gewicht) für die Basiskomponenten berücksichtigt werden.
Die finale Simulation der gewählten Komponenten beeinflusst nachträglich die Auswahl der Komponenten, da durch die Simulationsergebnisse Rückschlüsse auf die Verwendbarkeit der Module gezogen werden können. Durch die geeignete Auswahl von realitätsbezogenen Randbedingungen ist eine umfassende Bewertung des Gesamtsystems unter realen Betriebsbedingungen möglich.

- **Entwicklung oder Anpassung eines geeigneten Ladesystems hinsichtlich der benötigten modellierten Kapazitäten und Zeiten**

Die benötigten Bebunkerungszeiten sind je nach Schiffsart sehr unterschiedlich. Während ein konzipiertes Ausflugsschiff nur einmal die Woche aufgetankt werden soll und für diesen Vorgang mindestens 12 h im Hafen vor Anker liegt, soll das schnelle Städteshuttle von Tamsen Maritim täglich mehrmals zwischen Rostock und Kopenhagen pendeln und dabei möglichst geringe Befüllzeiten von unter 2 h benötigen. Hierzu werden die berechneten Bebunkerungszeiten durch herkömmliches Überströmen (z.B. via Shore-to-ship) mit den Zeiten für die Durchführung der SWAP-Methode verglichen.
Bei der Simulation eines Überströmprozesses zur Befüllung eines 20 ft-Containers ergeben sich Prozesszeiten von bis zu 136 min (min An- und Abschluss der Füllstützen) und bei der Befüllung eines 10 ft Containers Prozesszeiten von min. 70 min. Zur Bewertung der dem gegenüberstehenden SWAP-Methode werden für die Austauschzeit des H2-Containers die folgenden Aufgaben/Arbeitsschritte zusammen mit Tamsen Maritim abgeschätzt:

- Abschalten der Bordsysteme,
- Sichern der H2-Systeme und gegebenenfalls das Spülen der Rohrleitungen,
- Kappen der Rohrverbindungen,
- Kappen der elektrischen Verbindungen,
- Lösen der Containerverankerung zum Schiff,
- Herstellen der Kranverbindung zum Container,

- Abkranen des Containers,
- Kappen der Kranverbindungen,
- Herstellen der Kranverbindung zu einem neuen Container,
- Aufkranen,
- Sichern der Verbindung des Containers zum Schiff
- Koppeln der Rohrverbindungen sowie elektrischen Verbindungen zwischen Container und Schiff und
- Fluten der H2-Systeme mit H2.

Pro Container ist die Austauschzeit auf 30 min kalkuliert und von den Projektpartnern mit maritimer Expertise als realistisch eingestuft worden. Der gesamte Austauschprozess sollte demnach 1 h dauern, was zeigt, dass die SWAP-Methode gegenüber den herkömmlichen Bebunkerungsverfahren eine schnellere Prozesszeit ermöglicht.
Für die Betankung eines Containers an Land kann zudem auf eine detaillierte Errechnung der Bunkerungszeit auf Grund der SWAP-Methode verzichtet werden, da dies von der vorliegenden Infrastruktur abhängig ist (Tankstellenhersteller, Verdichterarchitektur, etc.).

AP 6 - Optimierung skalierbarer Wasserstoffenergiesysteme nach deren Typ und der Art der dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssysteme

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Integration der Wasserstoffenergiesysteme hinsichtlich des Typs und der Art des dezentralen Energiebereitstellungssystems unter besonderer Betrachtung realer Einsatzmöglichkeiten. Das Arbeitspaket gehört zur Integrationsphase des Teilprojekts 2.2.

- **Integration des skalierbaren Wasserstoffenergiesystems und des individuellen Energiebereitstellungssystems in standardisierte Schiffssysteme**

Die Integration eines skalierbaren Wasserstoffenergiesystems in standardisierte Schiffssysteme stellt eine wesentliche Herausforderung dar, da bestehende Schiffe auf fossile Brennstoffe und traditionelle elektrische Versorgungssysteme ausgelegt sind. Eine erfolgreiche Implementierung erfordert daher eine sorgfältige Anpassung der Wasserstofftechnologie an bestehende maritime Strukturen.
In Kooperation mit Tamsen Maritim wird das im Konzept 1 entwickelte Wasserstoffenergiebereitstellungssystem in das schnelle Städteshuttle integriert. Dabei wird eine Dimensionierung der Energiespeicherung (Wasserstoffdruckspeichercontainer), der Energieumwandlung (Brennstoffzellen) und des Kraftstofftransfers (Druckübersetzer und Druckleitungen) unter Berücksichtigung der Schiffsgegebenheiten vorgenommen, sowie ein Verfahrensfließschema zur Integration des Wasserstoffenergiebereitstellungssystems und seiner Komponenten erstellt. Bei der Integration werden auch der Überströmvorgänge (konventionelle Bebunkerung) für den spezifischen Anwendungsfall betrachtet. Des Weiteren werden Optimierungsmaßnahmen für die Umsetzung der entwickelten Konzepte diskutiert.

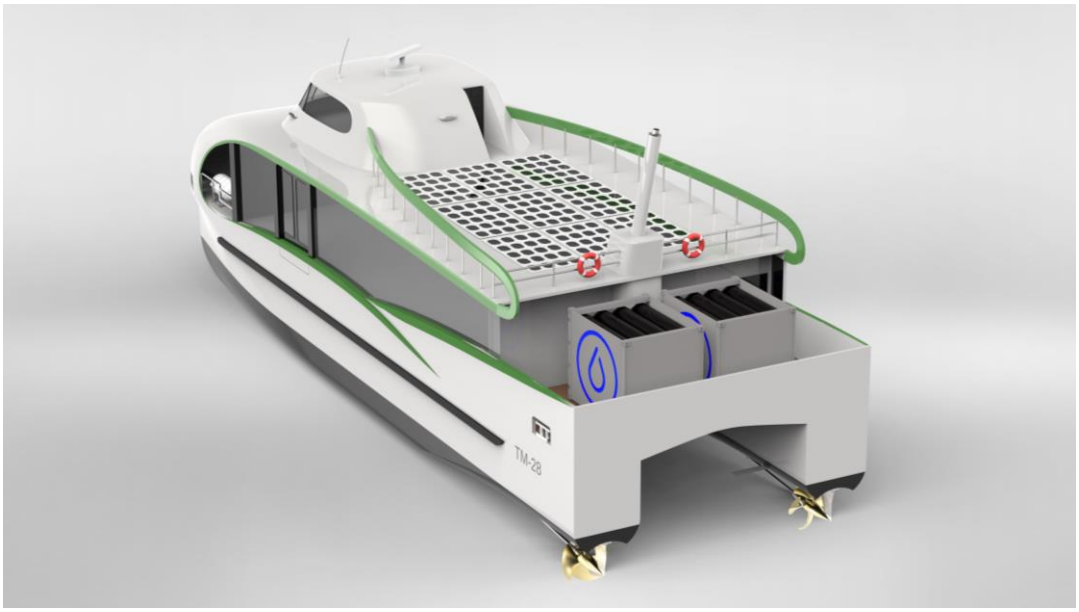


Abbildung 10: Konzeptbild des schnellen Städteshuttles mit integrierten 10 ft Wasserstoffdruckspeichercontainer [Quelle: Tamsen Maritim]

- **Optimierung der ausgewählten dezentralen und individuellen Energiebereitstellungssystems, sowie dessen Ladetechnologie auf standardisierte Schiffssysteme**

Der Fokus für die Optimierung des ausgewählten Energiebereitstellungssystems liegt im Rahmen der Ladetechnologie vordergründig bei der Verbesserung der Komponenten hinsichtlich ihres Einsatzzweckes für die maritimen Anforderungen der jeweiligen Schiffssysteme. Hierzu können zur Effizienzsteigerung im einfachsten Fall Softwareanpassungen getroffen werden, um die Steuerung und Regelung der Befüll- und Ladeprozesse zu verbessern. Um anzupassende Parameter zu ermitteln, werden Simulationen durchgeführt, welche es ermöglichen die Bebunkerungsvorgänge sowie die damit verbundenen Volumenströme zu analysieren. Durch diese ist es zudem möglich die benötigten Leitungsquerschnitte für eine ausreichende und verlustarme Energieübertragung schon bei der ersten Dimensionierung der Anlage korrekt zu berechnen.

Neben Softwareanpassungen stellen physische Änderungen an den Modulen einen zentralen Aspekt zur Optimierung dar. Diese betreffen auch die Verbesserung der austauschbaren Energiespeichermodule. Dies umfasst:

- **Material- und Gewichtsoptimierung**: Der Übergang von Schwer- zu Leichtbauweise trägt zur Reduzierung des Gesamtgewichts bei und verbessert die Effizienz.
- **Sicherheitssteigerung**: Der Einsatz von Failsafe-Verbindungen für Schlauch- und Leitungskupplungen verhindert unkontrollierten Kraftstoffaustritt und erhöht die Betriebssicherheit.
- **Optimierung des Lade- und SWAP-Vorgangs**: Die Ladekonzepte können verschiedenartig erweitert werden, wobei der Austausch der Energiemodule betrachtet wird, darunter die Nutzung eines bordeigenen Ladekrans oder einer landseitigen Infrastruktur. Ein Schiff mit eigenem Kran ist flexibler, da es unabhängig von Landanlagen neu beladen werden kann. Dies bringt aber eine Gewichtszunahme mit sich, die es abzuwägen gilt (vor allem für größere Schiffe relevant).

Gerade in der Anfangsphase des Systemeinsatzes ist bezüglich des zuletzt genannten Punktes eine hohe Flexibilität essenziell, um eine Redundanz zu landseitigen Versorgungssystemen zu schaffen, denn solange eine entsprechende Infrastruktur an Land nicht flächendeckend vorhanden ist, ist diese Autonomie sogar zwingend erforderlich, um eine kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen.

- **Erstellen eines detaillierten Verfahrensfließschema (engl. PFD: Process Flow Diagram) zur Integration der betrachteten Module aus Brennstoffzelle und Energiebereitstellungssystem**

Im folgenden PFD wird ein möglicher Ablauf für die Integration eines schiffseitigen Wasserstoffenergiebereitstellungssystems nach dem Konzept der Druckwasserstoffnutzung dargestellt. Hierbei wurde vor allem der Aspekt der allgemeinen Systementwicklung (nach der Konzeptionierung) nochmal detaillierter betrachtet.

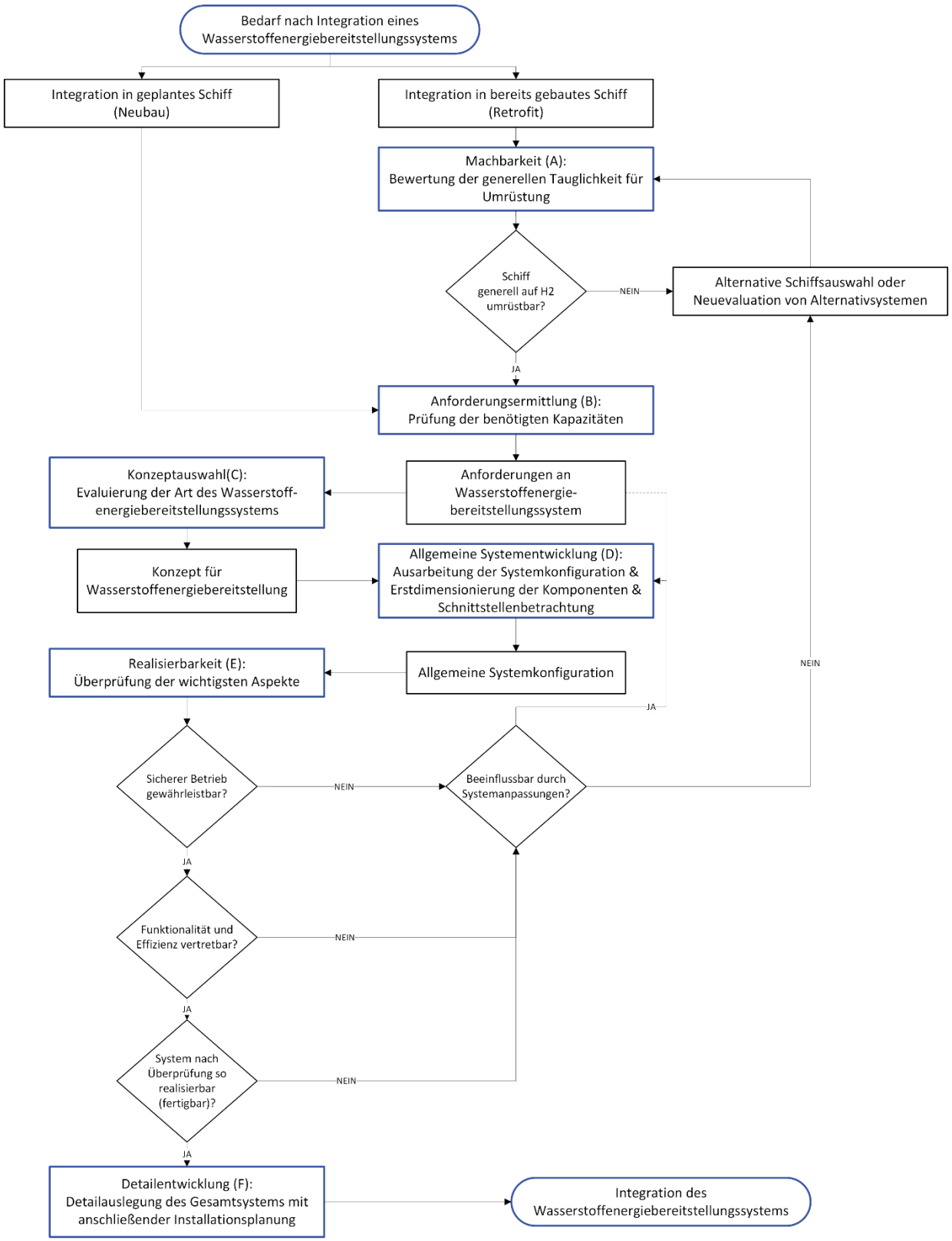


Abbildung 11: Integration eines schiffseitigen Wasserstoffenergiebereitstellungssystem

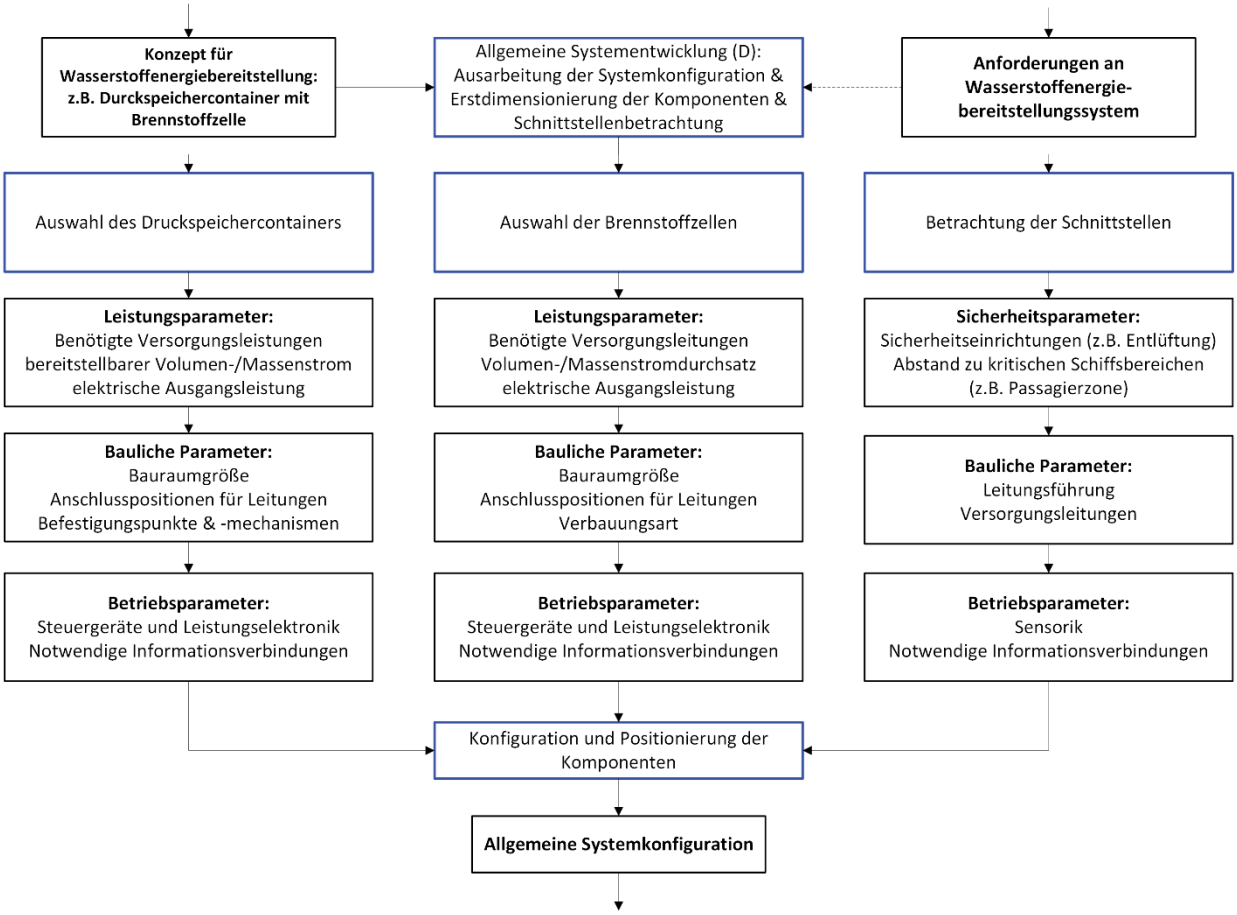


Abbildung 12: Allgemeine Systementwicklung

- **Integration der Übergabe von H2 – Energiebereitstellungssystem an Brennstoffzellensystem**

Zur Betrachtung der Übergabe vom Wasserstoffenergiebereitstellungssystem an das Brennstoffzellensystem wird der Versorgungsvorgang mit Wasserstoff am Beispiel des schnellen Städteshuttles in Abstimmung mit Tamsen Maritim simuliert und berechnet. Ziel ist es, den Leitungsquerschnitt der Hauptversorgungsleitung mit Wasserstoff bei der Integration des Systems auf dem Schiff auszulegen und dabei alle Sicherheitsvoraussetzungen zu erfüllen.

Hierfür wurde der Überstromvorgang aus den beiden Versorgungscontainern (2 x 10 ft Container, 2 x 250 kg H_2, bei 500 bar) über eine Niederdruckleitung (10 bar, Sicherheitstechnisches Maximum für lange Hauptleitung auf dem Passagierschiff) bis zum Abgang an das Brennstoffzellensystem simuliert.

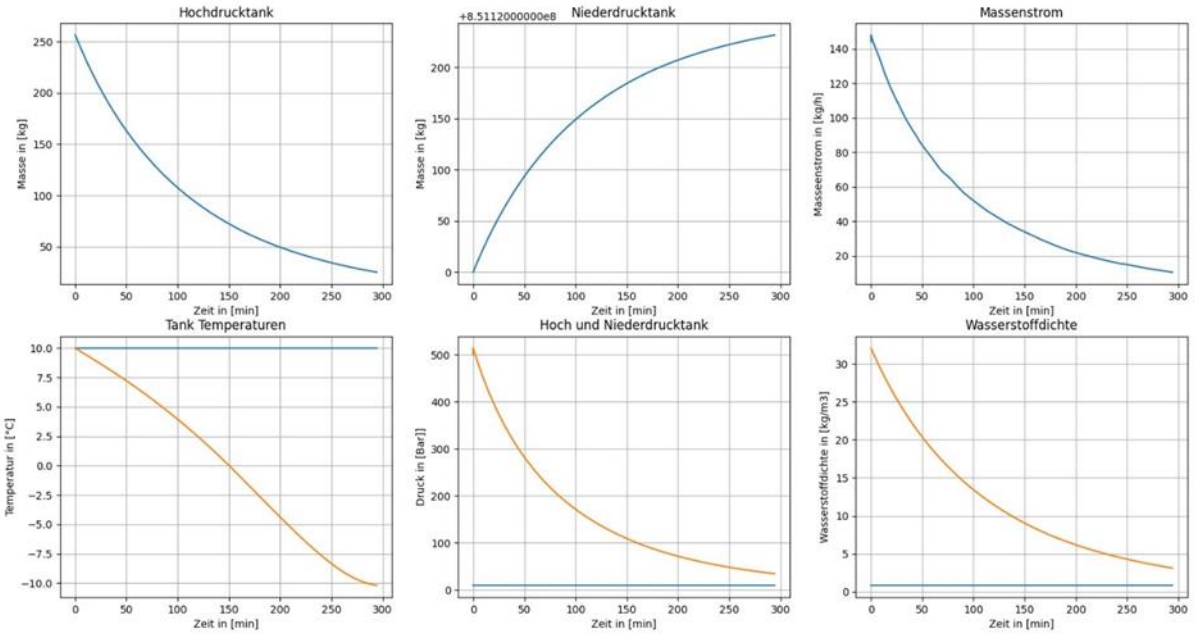


Abbildung 13: Simulierter Überströmprozess aus Druckwasserstoffspeichercontainer zu Brennstoffzellensystem

Ergebnis der Simulation ist, dass das für das Shuttle konfigurierte Wasserstoffenergiebereitstellungssystem in den gegebenen sicherheitstechnischen Betriebsgrenzen eine ausreichende Massenstromversorgung (max. 27 kg/h) für die Brennstoffzellen bietet (Maximalbetrieb bis <24 %, Minimalbetrieb bis <12 % und Notbetrieb bis <2 % Restfüllmenge möglich), noch bevor die Grenzkapazität der geplanten Pufferbatterien angetastet werden muss.
Nach Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten kann festgestellt werden, dass der angenommene und geplante Rohrquerschnitt von 20 mm ausreichend ist, da die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit nicht überschritten wird. Diese Simulation zeigt, dass ein Wasserstoffenergiebereitstellungssystem für den vorliegenden Anwendungsfall einsatzfähig ist und eine Übergabe durch eine Niederdruckleitung mit geeigneten Druckregelungseinrichtungen möglich ist.

- **Bewertung möglicher Optionen zur Auskopplung von H2 oder Wärme für sekundäre Zwecke auf dem Schiff**

Die sekundäre Nutzung von H_2 und Wärme kann durch die Unterstützung von Energieerzeugungsprozessen (durch z.B. Elimination zusätzlicher Aufheizaggregate bzw. benötigter Warmhaltevorgängen) die Gesamtenergieeffizienz des Schiffes verbessern. Bei den verschiedenen vorhandenen Möglichkeiten, ist zu beachten, dass bei der Nutzung des H_2-Stoffstromes, welcher den Primärkraftstoff in einem Wasserstoffenergiebereitstellungssystem darstellt, eine zusätzliche Nutzung in Konflikt zur Verwendung für den Antrieb und die Reichweite steht. Ist dies berücksichtigt, kann die Auskopplung von Wasserstoff dazu dienen durch Verstromung die Bordversorgung sicherzustellen (auch für Klimatisierung und Beleuchtung) bzw. durch die stoffliche Nutzung (in der Regel ineffizienter) weitere Abwärme zu erzeugen.
Die Nutzung von Abwärme an Bord von Schiffen bietet vielfältige Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und zur Energieeinsparung. Dafür benötigte Technologien stehen heute bereits zur Verfügung (z.B. Absorptionskältemaschine, die Adsorptionskältemaschine, Nutzung des Peltier-Effekt unter anderen). In den Passagierräumen kann die Abwärme für Heizzwecke oder zur Warmwasseraufbereitung eingesetzt werden. Bei größeren Schiffen ermöglichen komplexere Systeme die Nutzung der Abwärme für das Vorheizen von Betriebsstoffen sowie für die Meerwasserentsalzung, um Trinkwasser zu gewinnen. Darüber hinaus besteht generell die Möglichkeit, mittels Wärmerückgewinnungssystemen Strom zu erzeugen.
Weiterhin ist zu beachten, dass die Betriebstemperatur der Brennstoffzellen, speziell der auf reinem

Wasserstoff basierenden PEM-Brennstoffzellen, relativ niedrig ist (60-100 °C). Diese Temperatur reicht nicht für alle sekundären Nutzungszwecke aus, was die Einsatzmöglichkeiten der Abwärme einschränken kann. Daher muss die spezifische Eignung der verfügbaren Wärme für die geplanten Anwendungen genauer und individuell bewertet werden.

- **Verifizierung und Optimierung der entwickelten Modularität der Anlagentypen hinsichtlich des verwendeten Energieträgers**

Die Optimierung des Konzeptes auf den verwendeten Kraftstoff (reiner Druckwasserstoff) ist in vielerlei Hinsicht möglich. Gerade die Bereiche Logistik und Prozessgestaltung beim Be- und Entladen / Tanken können als die Bereiche identifiziert werden, die später einer genauen Abstimmung mit dem zugrunde liegenden Business Case bedürfen. An anderen Stellen konnten bereits jetzt die Parameterräume für Verbesserungen ausgearbeitet werden. z.B. das:

- Druckspeichercontainer und deren Druckstufe
    - Kein linearer Zusammenhang zwischen Druck und Masse -> Verdichtungsaufwand nur so hoch wie unbedingt notwendig auslegen ist die beste Optimierung
- Transfersystem (Gas Handling Unit & Druckleitungen)
    - Technische Flexibilität wird bei breiter Treibstoffverfügbarkeit geringer werden und es können Synergien mit andern Anlegesystemen gehoben werden -> siehe Fangsystem Projektpartner NSD
- Energieumwandlungssystem (z.B. PEM-Brennstoffzelle) für die Nutzung von Druckwasserstoff
    - Verbesserung durch eine Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades (z.B. Einbeziehen der Systemabwärme, um in sekundären Prozessen benötigte Kühlleistung bereit zu stellen, siehe oben)

Bei einzelnen Komponenten liegt die Verantwortung beim Hersteller, und kann nur an dieser Stelle bewertet werden, ob ein Markt für ein optimiertes Produkt gefunden werden kann. Generell gilt, dass eine Einzelkomponentenoptimierung auch immer eine Konzeptoptimierung mitbringen kann. Dies gilt es dann in konkreten Einfallbetrachtungen zu ermitteln und voll auszuschöpfen.

- **Dimensionierung der Grundeinheiten für H2 – Energiebereitstellungssystem und Ladetechnologie (schiffsseitig)**

Für die Dimensionierung der Grundeinheiten des H2-Energiebereitsstellungssystem für das Konzept 1 wird als reales Beispiel die Konfiguration der Komponenten des schnellen Städteshuttles von Tamsen Maritim gewählt. Diese orientiert sich an den am Markt verfügbaren Komponenten sowie deren Eignung für den Anwendungsfall. Das im Projekt geplante Städteshuttle benötigt eine elektrische Antriebsleistung von 2 x600 kW (1.200 kW), die durch Wasserstoffenergiespeichersysteme bereitgestellt werden soll. Zusätzlich wird ein Batteriepuffersystem mit einer Kapazität von 2 x 60 kWh benötigt, um eine konstante Energieversorgung sicherzustellen und den elektrischen Antrieb flexibel zu unterstützen.

Um dies umzusetzen, kann die elektrische Antriebsleistung durch ein Brennstoffzellensystem mit 8 Einheiten (2 Reihen mit 4 BZ) realisiert werden, welches eine Leistung von ca. 200 kW pro Zelle vorsieht (Grundmodulleistung). Diese erfüllen bei einer Auslastung von 80 % die geforderte Leistung bei gleichzeitigem Vorhalten einer Leistungsreserve, was zusätzlich ein Schonen der Zellen und eine Absicherung gegen Ausfälle bedingt.
Um ausreichend Kraftstoff für die geplante Strecke von Rostock nach Kopenhagen vorzuhalten, ist eine Mindestentnahmemenge von 400 kg erforderlich. Diese wird durch zwei 10 ft Wasserstoffdruckspeichercontainer gewährleistet. Mit einer Kapazität von 250 kg pro Container, ist (auch mit Mindestfüllmenge) ausreichend Kraftstoff für die Überfahrt vorhanden.
Der Transfer und die benötigte Druckübersetzung von Speichereinheit zu Brennstoffzelle wird durch die Handhabung mittels zweier Gas Handling Units sichergestellt. Diese steuern die Absenkung von 500 bar Hochdruck auf die Niederdruck-Hauptleitung und regeln den benötigten Volumenstrom, wodurch eine ausreichende und effiziente Versorgung der Brennstoffzellen gewährleistet werden kann.

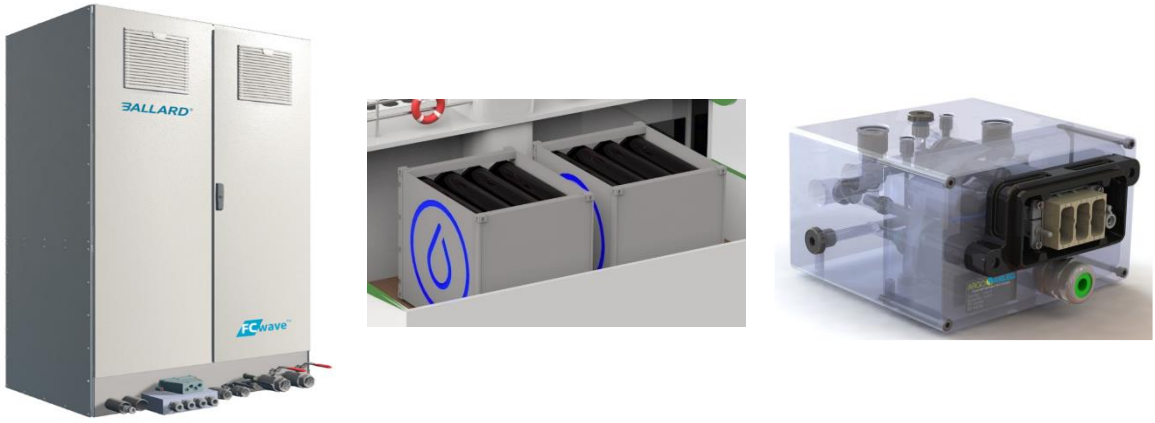


Abbildung 14: Konfigurationsbeispiel für Wasserstoffenergiebereitstellungssystem Konzept 1: Ballard FC Wave Brennstoffzelle [Quelle: Ballard Power Systems] (links); integrierte 10 ft Speichercontainer [Quelle: Tamsen Maritim] (mittig); HP GHU 350 - Gas Handling Unit [Quelle: Argo-Anleg GmbH] (rechts)

Diese Gesamtkonfiguration stellt eine Auslegungsvariante marktverfügbarer Grundkomponenten für das Wasserstoffenergiebereitstellungssystem am Beispiel des schnellen Städteshuttles dar.

- **Ableitung von Optimierungsmaßnahmen für die Weiterentwicklung der Konzepte**

Die entwickelten Konzepte bieten grundsätzlich die Möglichkeit, sowohl in Neubauten als auch bei Retrofit-Projekten in maritimen Einheiten umgesetzt zu werden. Diese Erkenntnis resultiert aus Gesprächen mit den Projektpartnern. Dennoch wurde Optimierungspotenzial in bestimmten Bereichen identifiziert, insbesondere in der detaillierten Betrachtung und Positionierung der Systeme innerhalb des Schiffs.
Ein zentrales Optimierungsfeld betrifft die grundlegenden Herausforderungen, die mit der Integration der Systeme einhergehen. Dazu zählt insbesondere die Berücksichtigung des Massenschwerpunkts der Einheiten zur Sicherstellung der Gewichtsstabilisierung des Schiffs. Eine verbesserte Positionierung kann dazu beitragen, die Balance des Schiffs zu optimieren und unerwünschte Auswirkungen auf die Manövrierfähigkeit zu minimieren.
Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Zugänglichkeit der Systeme, sowohl für Wartungszwecke als auch für eine schnelle Reaktion im Falle technischer Störungen. Dies trägt nicht nur zur Betriebseffizienz bei, sondern ermöglicht auch eine effektivere Schadensbegrenzung im Havariefall. Gleichzeitig ist es essenziell, Maßnahmen zur Minimierung von Gefahrenpotenzialen zu implementieren, insbesondere im Hinblick auf Notfallszenarien. Außerdem kann die Ventilation der Systeme verbessert werden, welche eine entscheidende Rolle für die Effizienz und Sicherheit spielt. Eine verbesserte Luftzirkulation kann zur Temperaturregulierung beitragen und das Risiko von Überhitzung oder Ansammlung potenziell gefährlicher Gase minimieren.

Durch die gezielte Weiterentwicklung dieser Aspekte kann die Praxistauglichkeit der Konzepte weiter gesteigert und eine nachhaltige Optimierung der Systeme in maritimen Einheiten sichergestellt werden.