



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Zero Emission Saphir

**(H2-Schiff) Umbau und Versuchsbetrieb mit wasserstoffbasierter Antriebs-
technologie**

Schlussbericht Phase 1



Lou Halter, Shiptec AG

Daniel Mathis, Shiptec AG

Martin Einsiedler, Shiptec AG

Werftstrasse 5, 6002 Luzern, l.halter@shiptec.ch, www.shiptec.ch

Begleitgruppe

H. Prof. Dr. Christopher Onder, ETH Zürich
H. Francesco Musto, Bundesamt für Verkehr
H. Dr. Luca Castiglioni, Bundesamt für Energie
H. Dr. Panayotis Dimopoulos Eggenschwiler, Empa
H. Dr. Stephan Husen, Bundesamt für Verkehr
H. Prof. Dr. Ing. Prof. Vincent Bourquin, HEIA-FR

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Stany Rochat, BAV

Projektnummer: 260
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Luzern, den 19.02.2025

Inhalt

Inhalt.....	3
Liste der Tabellen.....	4
Liste der Abbildungen.....	4
Zusammenfassung in Deutsch.....	5
Résumé en français.....	8
Summary in English	11
1. Ausgangslage.....	14
2. Ziel der Arbeit.....	14
3. Auslegung des Schiffes und Zulassung.....	15
4. Umweltbilanz des Umbaus.....	32
5. Diskussion.....	35
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	38
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	40
Literaturverzeichnis	42

Liste der Tabellen

Tabelle 1: Gewichtsbilanz Umbau.....	22
Tabelle 2: Schiffsverdrängung vor und nach dem Umbau	22
Tabelle 3: Eingangsparameter für die Simulation	24
Tabelle 4: Wirkungsgrade in der Simulation	25
Tabelle 5: Ergebnisse aus der Simulation	27

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Risk Based Certification (RBC) Prozess	16
Abbildung 2: Übersicht Steuerungen	21
Abbildung 3: Simulation von einen Tag mit 8 Rundfahrten.....	26
Abbildung 4: Systemgewichte und Zusammenhang mit Anzahl Räumen mit zunehmender Nettoenergiemenge	28
Abbildung 5: Vergleich Treibhausgasemissionen der beiden Antriebsalternativen aus [1]	33
Abbildung 6: Vergleich Einfluss Treibstoffalternativen und Herstellungsverfahren aus [1]	34
Abbildung 7: Single Line Diagram	48

Zusammenfassung in Deutsch

Das Projekt *Zero Emission Saphir* zielt darauf ab, die Emissionen in der Schweizer Binnenschifffahrt durch den Einsatz von grünem Wasserstoff als alternativen Treibstoff zu reduzieren. Im Rahmen eines Pilotprojekts wird das Passagierschiff die *MS Saphir* zum ersten wasserstoffbetriebenen Schiff im fahrplanmässigen Einsatz der Schweiz umgerüstet. Der Wasserstoff wird regional aus Wasserkraft gewonnen. Durch die Beteiligung der SGV AG an der Produktion wird die Versorgungssicherheit gewährleistet. Das Projekt dient als Machbarkeitsstudie und Modell für zukünftige Entwicklungen in der emissionsfreien Schifffahrt. Der Fokus liegt zunächst auf der Schaffung einer technischen und regulatorischen Grundlage für die Integration von Wasserstoffantrieben in Schiffen. Dazu wird ein international anerkanntes risikobasiertes Zulassungsverfahren der Klassifikationsgesellschaft (Klasse) Lloyd's Register (LR) und unter Einbezug des Bundesamts für Verkehr (BAV) angewendet, da bisher keine präskriptiven nationalen oder internationalen Regeln für dessen Zulassung existieren. Dieser Prozess ermöglicht die Bewertung und Zulassung von Technologien, die von bestehenden Vorschriften abweichen oder neuartig sind, wie der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff. Zudem sollen Standards für Komponenten, Sicherheitsfunktionen und Systemsteuerungen etabliert werden, die zukünftige Um- und Neubauten vereinfachen.

Der risikobasierte Zulassungsprozess, kurz RBC-Prozess von LR umfasst eine umfassende Risikoabschätzung, die sicherstellt, dass sowohl die Risiken für Personen als auch die betrieblichen Anforderungen der Klasse und der Behörden als akzeptabel eingestuft werden können. Ein zentraler Aspekt des Prozesses ist die Einbindung aller relevanten Parteien, darunter Behörden, Lieferanten, Betreiber und die Klassifikationsgesellschaft selbst. Für das Design wurde einem *Approval in Principle* (AiP) erteilt, das bestätigt, dass der gewählte Ansatz den Sicherheitsanforderungen entspricht.

Ein weiteres Ziel ist die Analyse der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Wasserstoffantriebs im Vergleich zu konventionellen Antrieben. Die Ergebnisse sollen das Potenzial zur CO₂-Reduktion und die Praktikabilität der Technologie für die Schweizer Binnenschifffahrt aufzeigen. Die gewonnenen Erkenntnisse können als Entscheidungsgrundlage für zukünftige Projekte dienen und eine fundierte Basis für die Dekarbonisierung der Schifffahrt in der Schweiz schaffen.

Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse und der geringen Leistungsanforderungen wurde ein kompaktes, modulares Brennstoffzellenmodul ausgewählt und so integriert, dass eine Skalierbarkeit möglich ist sowie die Integration in bestehende Schiffsstrukturen vereinfacht wird. Damit entspricht es den spezifischen Anforderungen des Schweizer Binnenschiffmarktes.

Für das Wasserstoffsystem mit Druckspeichertanks im Unterdeck werden aktive und passive Sicherheitsmaßnahmen kombiniert, darunter eine redundante Lüftung, verschiedene Sicherheitsventile und eine kontinuierliche Überwachung durch Sensoren. Das Antriebskonzept des Schiffes basiert auf einem etablierten seriellen Hybridsystem, bei dem der Batteriespeicher als primäre unabhängige Energiequelle fungiert. Die Brennstoffzellen speisen zusätzliche Energie in das System. Dadurch lässt sich das Wasserstoffsystem jederzeit in einen Sichere Modus versetzen, welches einen integralen Bestandteil des

Sicherheitskonzeptes darstellt. Die unabhängigen Steuerungs- und Überwachungssysteme für die Brennstoffzelle und die Wasserstoffbewirtschaftung sind mehrstufig redundant und kommunizieren mit dem EPMS, um Betriebs- und Statusinformationen auszutauschen und gezielte Leistungsanforderung zu stellen. Die Integration der Systeme in das Schiff erfolgte iterativ unter Berücksichtigung von Gewichtsberechnungen und hydrostatischer Stabilität. Mit einer ausgewogenen Verteilung der Komponenten kann auch bei einer deutlichen Zunahme der Schiffverdrängung, die Anforderungen an die Stabilität erfüllt werden.

Die Optimierung des Energiesystems basiert auf einem Simulationsmodell, das den effizientesten Betrieb der Brennstoffzelle und den Wasserstoffverbrauch über einen Tag simuliert. Dabei wird die Brennstoffzelle auf einem konstanten Betriebspunkt gehalten, um die Lebensdauer zu maximieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Systeme die Anforderungen für den täglichen Betrieb erfüllen, einschließlich technischer und betrieblicher Grenzwerte. Ausgelegt wurde das Schiff auf eine Kombination von 100 kg Wasserstoff mit 640 kWh Batteriespeicher. Die aktuelle hybride Auslegung mit einer gesamt Energie (H₂ + Batterie) von 2150 kWh ergibt eine Wasserstoffautonomie von 2-3 Tagen bei acht Rundfahrten am Tag. Ausserdem können im eintages Tankintervall gängige Ersatzkurse (z.B: Luzern-Vitznau) gefahren werden.

Ein Systemvergleich zwischen einem Wasserstoff-Hybrid Antrieb und einem Batterie Antrieb zeigt auf, wo die technischen Grenzen dieser beiden Antriebsalternativen liegen und bilden damit die Entscheidungsgrundlage für die Systemwahl. Die beiden Antriebsalternativen wurden für einen steigenden Energiebedarf skaliert und dafür wurde der Platzbedarf eruiert, wie auch die Systemgewichte berechnet. Bei 1280kWh Nettoenergie-Speicher im Schiff sind beide Systeme hinsichtlich Gewicht vergleichbar. Mit zunehmender Energiemenge ist die Wasserstoffvariante aufgrund des geringeren Gewichtes der Batterievariante überlegen. Aufgrund des Gewichtes ist die Batterievariante bei der benötigten Energiemenge für den Betrieb der MS Saphir auch auf Ersatzkursen (> 2000 kWh), aufgrund des zu hohen Gewichtes nicht umsetzbar.

Für die Wasserstoff Betankung ist Landseitig eine Tankstellen Infrastruktur erforderlich. Bei der Batterievarianten ist ab 640 kWh Energiespeicher, aufgrund der aktuell vorhandenen Infrastruktur, ein Ausbau der Anschlüsse an Land erforderlich. Beide Systeme erfordern für den Betrieb der MS Saphir ein Ausbau der Landinfrastruktur, wobei nur der Bau einer Wasserstofftankstelle näher untersucht wurde.

Der ausschliesslich aus nachhaltiger Energie (Wasserkraft und Solar) erzeugte Wasserstoff wird zukünftig aus einer neuen Anlage in Bürglen (UR) nach Luzern zur Tankstelle geliefert.

Im Rahmen dieses Projekts wurde das CO₂-Einsparungspotenzial eines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Batterie-Hybridantriebs im Vergleich zu einem Diesel-Hybrid-Antrieb für ein Passagierschiff untersucht. Die Ökobilanzstudie [1] betrachtet den gesamten Lebenszyklus der Komponenten des neuen Antriebsystems, inklusive Umbau, Betrieb und Entsorgung. Der Wasserstoffantrieb verursacht 1,26 kg CO₂-eq/Fzkm, während der Diesel-Hybrid Antrieb 7,69 kg CO₂-eq/Fzkm emittiert, welches ungefähr einer Reduktion um das Sechsfache entspricht. Die höheren Emissionen beim Umbau werden durch die deutlich geringeren

Betriebsemissionen mehr als ausgeglichen. Die Studie bestätigt, dass der Wasserstoffantrieb klimafreundlicher ist als ein Diesel-Hybrid Antrieb, selbst bei Variationen im Wasserstoffverbrauch oder dem Einsatz von Biodiesel. Der Umbau auf Wasserstoff stellt somit eine sinnvolle Maßnahme für eine klimaneutrale Schifffahrt in der Schweiz dar.

Bereits vorgängige Studien wie *Helios* [2] und *CO₂ freies Berner Oberland* [3] haben die technische Machbarkeit von Wasserstoffantrieben in der Binnenschifffahrt gezeigt und wichtige Grundlagen konnten von diesen Studien übernommen werden. Dennoch sollten neue technische Trends und ökonomische Rahmenbedingungen laufend berücksichtigt werden.

Die Finanzierung von Wasserstoffantrieben in Schiffen ist eine Herausforderung, da die Investitions- und Betriebskosten höher sind als bei konventionellen Antrieben. Eine technologie-neutrale Subventionierung könnten Anreize für ökologischere Alternativen schaffen. Auch der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur ist komplex und teuer. Synergien mit anderen Verkehrsträgern könnten hier Abhilfe schaffen. Für die Betankungsinfrastruktur wird empfohlen, frühzeitig Kooperationen mit bestehenden Wasserstofftankstellen zu prüfen. Die Autoren dieser Studie möchten darauf hinweisen, dass private Investitionen in CO₂-neutrale, aber kostenintensive Technologie – wie sie im Rahmen dieses Projektes von der SGV AG getätigt werden – trotz grosszügiger Förderung durch das Programm EsöV 2050, eine Herausforderung bleiben. Im vorliegenden Projekt ist die private Investition um einiges höher als bei einer vergleichbaren Dieselantriebsalternative. Die Vorteile der angewandten Technologie im ökologischen Kontext ist zwar unbestritten, eine flächendeckende Umsetzung ist aber nur möglich, wenn sich die ökonomischen Rahmenbedingungen ändern oder momentan geltende, z.T. finanzpolitische Massnahmen angepasst werden und ein effektiver Anreiz zur Umstellung auf ökologische Antriebe geschaffen wird.

Insgesamt stellt das Projekt einen innovativen Ansatz dar, der die Integration von Wasserstoff in die Binnenschifffahrt ermöglicht und gleichzeitig eine hohe Sicherheit bietet. Die Autoren empfehlen, das Konzept zu realisieren, um die Praxistauglichkeit einer im Betrieb CO₂-neutralen Antriebsalternative vollumfänglich nachzuweisen und auf Ihre Alltagstauglichkeit zu prüfen. Dies kann einerseits ein Anreiz für die weitere Umsetzung solch innovativer Technologie sein, andererseits werden insbesondere in Bezug auf die Zulassung und den Betrieb Hürden abgebaut, weil der Beweis erbracht wird, dass dieses Konzept auch im täglichen Fahrplanbetrieb funktioniert. Vor diesem Hintergrund kann das Projekt als echter Wendepunkt in der Binnenschifffahrt, insbesondere in der Schweiz, betrachtet werden.

Résumé en français

Le projet Zero Emission Saphir vise à réduire les émissions dans la navigation intérieure suisse grâce à l'utilisation de l'hydrogène vert comme carburant alternatif. Dans le cadre d'un projet pilote, le navire à passagers MS Saphir sera transformé pour devenir le premier navire à hydrogène en service régulier en Suisse. L'hydrogène sera produit localement à partir de l'énergie hydraulique. La participation de la Société de Navigation sur le Lac des Quatre-Cantons SVG AG à la production garantit la sécurité de l'approvisionnement. Ce projet sert d'étude de faisabilité et de modèle pour les futurs développements dans la navigation sans émissions. L'accent est mis sur la création d'une base technique et réglementaire pour l'intégration de systèmes de propulsion à hydrogène dans les navires. Pour cela, un processus d'approbation basé sur les risques (Risk Based Certification, RBC), reconnu internationalement, de la société de classification Lloyd's Register (LR) est appliqué, en collaboration avec l'Office fédéral des transports (OFT), car il n'existe actuellement aucune règle nationale ou internationale prescriptive pour l'approbation de tels systèmes. Ce processus permet d'évaluer et d'approuver des technologies qui diffèrent des réglementations existantes ou qui sont novatrices, comme l'utilisation de l'hydrogène comme carburant. De plus, des normes pour les composants, les fonctions de sécurité et les systèmes de contrôle seront établies, ce qui facilitera les futures conversions et constructions à neuf.

Le processus d'approbation RBC de LR comprend une évaluation approfondie des risques, garantissant que les risques pour les personnes et les exigences opérationnelles de la classe et des autorités sont considérés comme acceptables. Un aspect central de ce processus est l'implication de toutes les parties concernées, y compris les autorités, les fournisseurs, les exploitants et la société de classification elle-même. Pour la conception, une *Approval in Principle (AiP)* a été accordée, confirmant que l'approche choisie répond aux exigences de sécurité.

Un autre objectif est d'analyser les impacts environnementaux et économiques de la propulsion à hydrogène par rapport aux systèmes de propulsion conventionnels. Les résultats devraient démontrer le potentiel de réduction des émissions de CO₂ et la praticabilité de cette technologie pour la navigation intérieure suisse. Les connaissances acquises serviront de base pour les futurs projets et contribueront à la décarbonisation de la navigation en Suisse.

En raison de l'espace limité et des faibles niveaux de puissance, un module compact et modulaire de pile à combustible a été choisi et intégré de manière à permettre une mise à l'échelle et à faciliter l'intégration dans les structures existantes des navires. Cela répond aux exigences spécifiques du marché suisse de la navigation intérieure.

Pour le système à hydrogène avec réservoirs de stockage sous pression dans la cale, des mesures de sécurité actives et passives sont combinées, notamment une ventilation redondante, diverses vannes de sécurité et une surveillance continue par des capteurs. Le concept de propulsion du navire repose sur un système hybride série établi, où la batterie sert de source d'énergie primaire indépendante. Les piles à combustible fournissent une énergie supplémentaire au système. Cela permet de mettre le système à hydrogène en mode sûr à tout moment,

ce qui constitue un élément clé du concept de sécurité. Les systèmes de contrôle et de surveillance indépendants pour la pile à combustible et la gestion de l'hydrogène sont redondants à plusieurs niveaux et communiquent avec le système de gestion de l'énergie du navire (EPMS) pour échanger des informations opérationnelles et d'état, ainsi que pour fournir la puissance requise. L'intégration des systèmes dans le navire a été réalisée de manière itérative, en tenant compte des calculs de poids et de la stabilité hydrostatique. Avec une répartition équilibrée des composants, les exigences de stabilité peuvent être satisfaites même en cas d'augmentation significative du déplacement du navire.

L'optimisation du système énergétique repose sur un modèle de simulation qui simule le fonctionnement le plus efficace de la pile à combustible et la consommation d'hydrogène sur une journée. La pile à combustible est maintenue à un point de fonctionnement constant pour maximiser sa durée de vie. Les résultats montrent que les systèmes répondent aux exigences pour un fonctionnement quotidien, y compris les limites techniques et opérationnelles. Le navire est conçu pour une combinaison de 100 kg d'hydrogène avec un stockage de batterie de 640 kWh. La configuration hybride actuelle, avec une énergie totale (H₂ et batterie) de 2150 kWh, offre une autonomie en hydrogène de 2 à 3 jours pour huit courses par jour. De plus, des courses de remplacement courants (par exemple, Lucerne-Vitznau) peuvent être effectués avec un intervalle de ravitaillement d'une journée.

Une comparaison des systèmes entre une propulsion hybride à hydrogène et une propulsion entièrement électrique montre les limites techniques de ces deux alternatives et constitue la base de décision pour le choix du système. Les deux alternatives ont été mises à l'échelle pour un besoin énergétique croissant, et l'espace requis ainsi que les poids des systèmes ont été calculés. Avec un stockage d'énergie nette de 1280 kWh à bord, les deux systèmes sont comparables en termes de poids. Avec une augmentation de la quantité d'énergie, la variante hydrogène est meilleure en raison du poids moindre par rapport à la variante batterie. En raison du poids, la variante batterie n'est pas réalisable pour l'énergie nécessaire au fonctionnement du bateau MS Saphir sur des courses de remplacement (> 2000 kWh).

Pour le ravitaillement en hydrogène, une infrastructure de stations-service à terre est nécessaire. Pour la variante batterie, à partir de 640 kWh de stockage d'énergie, un renforcement des alimentations électriques à terre est requis par rapport à l'infrastructure actuellement disponible. Les deux systèmes nécessitent une extension de l'infrastructure terrestre pour le fonctionnement du MS Saphir, bien que seule la construction d'une station-service à hydrogène ait été étudiée plus en détail.

L'hydrogène, produit exclusivement à partir d'énergies renouvelables (hydraulique et solaire), sera à l'avenir acheminé depuis une nouvelle installation à Bürglen (UR) jusqu'à la station-service de Lucerne.

Dans le cadre de ce projet, le potentiel de réduction des émissions de CO₂ d'un système de propulsion hybride hydrogène-pile à combustible-batterie a été comparé à celui d'un système hybride diesel pour un navire à passagers. L'étude d'analyse du cycle de vie [1] examine l'ensemble du cycle de vie des composants du nouveau système de propulsion, y compris la con-

version, l'exploitation et la mise au rebut. La propulsion à hydrogène émet 1,26 kg CO₂-éq/véhicule-km, tandis que le système hybride diesel émet 7,69 kg CO₂-éq/véhicule-km, ce qui correspond à une réduction d'environ six fois. Les émissions plus élevées lors de la conversion sont plus que compensées par les émissions d'exploitation nettement inférieures. L'étude confirme que la propulsion à hydrogène est plus respectueuse du climat qu'un système hybride diesel, même avec des variations de la consommation d'hydrogène ou l'utilisation de biodiesel. La conversion à l'hydrogène représente donc une mesure judicieuse pour une navigation climatiquement neutre en Suisse.

Des études préalables telles que *Helios* [2] et *CO2 freies Berner Oberland* [3] ont démontré la faisabilité technique des systèmes de propulsion à hydrogène dans la navigation intérieure, et des bases importantes ont été tirées de ces études. Cependant, les nouvelles tendances techniques et les conditions économiques doivent être prises en compte en continu.

Le financement des systèmes de propulsion à hydrogène pour les navires est un défi, car les coûts d'investissement et d'exploitation sont plus élevés que pour les systèmes conventionnels. Une subvention technologiquement neutre pourrait encourager des alternatives plus écologiques. Le développement de l'infrastructure hydrogène est également complexe et coûteux. Des synergies avec d'autres modes de transport pourraient apporter des solutions. Pour l'infrastructure de ravitaillement, il est recommandé d'examiner rapidement des coopérations avec des stations-service à hydrogène existantes. Les auteurs de cette étude soulignent que les investissements privés dans des technologies neutres en CO₂ mais coûteuses – comme ceux réalisés par la SGV AG dans le cadre de ce projet – restent un défi, malgré le généreux soutien du programme Stratégie énergétique dans les transports publics (*STEP*) 2050. Dans le présent projet, l'investissement privé est nettement plus élevé que pour une alternative comparable à moteur diesel. Bien que les avantages écologiques de la technologie appliquée soient incontestables, une mise en œuvre à grande échelle ne sera possible que si les conditions économiques changent ou si les mesures financières actuelles sont adaptées pour créer une incitation efficace à la transition vers des systèmes de propulsion écologiques.

Dans l'ensemble, ce projet représente une approche innovante qui permet l'intégration de l'hydrogène dans la navigation intérieure tout en offrant un haut niveau de sécurité. Les auteurs recommandent de concrétiser ce concept pour démontrer pleinement la viabilité opérationnelle d'une alternative de propulsion neutre en CO₂ et pour tester son applicabilité au quotidien. Cela pourrait encourager une mise en œuvre plus large de cette technologie innovante et réduire les obstacles liés à l'approbation et à l'exploitation, en prouvant que ce concept fonctionne dans le cadre d'un service régulier. Dans ce contexte, ce projet peut être considéré comme un véritable tournant dans la navigation intérieure, en particulier en Suisse.

Summary in English

The *Zero Emission Saphir* project aims to reduce emissions in Swiss inland shipping by using green hydrogen as an alternative fuel. As part of a pilot project, the passenger ship MS Saphir is being converted into Switzerland's first hydrogen-powered ship for scheduled operations. The hydrogen is produced regionally from hydropower. The involvement of SGV AG in the production ensures supply security. The project serves as a feasibility study and model for future developments in emission-free shipping. The initial focus is on creating a technical and regulatory foundation for integrating hydrogen propulsion in ships. To achieve this, an internationally recognised risk-based approval process by the classification society Lloyd's Register (LR) is being applied, in collaboration with the Federal Office of Transport (FOT), as there are currently no prescriptive national or international rules for such approvals. This process allows for the evaluation and approval of technologies that deviate from existing regulations or are novel, such as the use of hydrogen as a fuel. Additionally, standards for components, safety functions, and system controls are to be established, simplifying future conversions and new builds.

The risk-based approval process, or RBC process by LR, includes a comprehensive risk assessment to ensure that risks to personnel and operational requirements of the class and authorities are deemed acceptable. A central aspect of the process is the involvement of all relevant parties, including authorities, suppliers, operators, and the classification society itself. For the design, an Approval in Principle (AiP) has been granted, confirming that the chosen approach meets safety requirements.

Another goal is to analyse the environmental and economic impacts of hydrogen propulsion compared to conventional systems. The results are expected to demonstrate the potential for CO₂ reduction and the practicality of the technology for Swiss inland shipping. The insights gained can serve as a basis for decision-making in future projects and provide a solid foundation for the decarbonisation of shipping in Switzerland.

Due to limited space and low power requirements, a compact, modular fuel cell module has been selected and integrated to allow scalability and simplify integration into existing ship structures. This meets the specific requirements of the Swiss inland shipping market.

For the hydrogen system with pressure storage tanks in the lower deck, active and passive safety measures are combined, including redundant ventilation, various safety valves, and continuous monitoring by sensors. The ship's propulsion concept is based on an established serial hybrid system, where the battery storage acts as the primary independent energy source. The fuel cells supply additional energy to the system. This allows the hydrogen system to be switched to a safe mode at any time, which is an integral part of the safety concept. The independent control and monitoring systems for the fuel cell and hydrogen management are multi-level redundant and communicate with the EPMS to exchange operational and status information and make targeted power requests. The integration of the systems into the ship was carried out iteratively, considering weight calculations and hydrostatic stability. With a balanced distribution of components, stability requirements can be met even with a significant increase in ship displacement.

The optimisation of the energy system is based on a simulation model that simulates the most efficient operation of the fuel cell and hydrogen consumption over a day. The fuel cell is maintained at a constant operating point to maximise its lifespan. The results show that the systems meet the requirements for daily operation, including technical and operational limits. The ship is designed for a combination of 100 kg of hydrogen with 640 kWh of battery storage. The current hybrid configuration, with a total energy capacity (H₂ and battery) of 2150 kWh, provides a hydrogen autonomy of 2-3 days with eight round trips per day. Additionally, common replacement routes (e.g., Lucerne-Vitznau) can be operated within a one-day refuelling interval.

A system comparison between a hydrogen-hybrid propulsion system and a battery propulsion system highlights the technical limitations of these two alternatives and forms the basis for system selection. Both alternatives were scaled for increasing energy demands, and the space requirements and system weights were calculated. With 1280 kWh of net energy storage on board, both systems are comparable in terms of weight. However, as energy requirements increase, the hydrogen option becomes superior due to its lower weight compared to the battery option. For the energy required to operate the MS Saphir, including replacement routes (> 2000 kWh), the battery option is not feasible due to excessive weight.

For hydrogen refuelling, a land-based refuelling infrastructure is required. For the battery option, with an energy storage of 640 kWh, an expansion of the land-based connections is necessary due to the current infrastructure limitations. Both systems require an expansion of land infrastructure for the operation of the MS Saphir, although only the construction of a hydrogen refuelling station has been examined in detail.

The hydrogen, produced exclusively from sustainable energy sources (hydropower and solar), will in the future be delivered from a new facility in Bürglen (UR) to the refuelling station in Lucerne.

As part of this project, the CO₂ reduction potential of a hydrogen fuel cell battery hybrid propulsion system compared to a diesel-hybrid propulsion system for a passenger ship was investigated. The life cycle assessment study [1] considers the entire life cycle of the components of the new propulsion system, including conversion, operation, and disposal. The hydrogen propulsion system emits 1.26 kg CO₂-eq/passenger-kilometre, while the diesel-hybrid system emits 7.69 kg CO₂-eq/passenger-kilometre, representing a reduction of approximately sixfold. The higher emissions during conversion are more than offset by the significantly lower operational emissions. The study confirms that hydrogen propulsion is more climate-friendly than diesel-hybrid propulsion, even with variations in hydrogen consumption or the use of bio-diesel. The conversion to hydrogen thus represents a meaningful step towards climate-neutral shipping in Switzerland.

Previous studies such as *Helios* [2] and *CO₂-freies Berner Oberland* [3] have demonstrated the technical feasibility of hydrogen propulsion in inland shipping, and important foundations from these studies have been adopted. However, new technical trends and economic frameworks should be continuously considered.

Financing hydrogen propulsion in ships is a challenge, as investment and operating costs are higher than for conventional systems. Technology-neutral subsidies could create incentives for more ecological alternatives. The expansion of hydrogen infrastructure is also complex and expensive. Synergies with other transport sectors could help here. For refuelling infrastructure, early cooperation with existing hydrogen refuelling stations is recommended. The authors of this study point out that private investments in CO₂-neutral but cost-intensive technologies – such as those made by SGV AG in this project – remain a challenge despite generous funding from the *EsöV 2050* programme. In this project, the private investment is significantly higher than for a comparable diesel propulsion alternative. While the ecological benefits of the applied technology are undisputed, widespread implementation is only possible if economic conditions change or current financial policy measures are adjusted to create effective incentives for switching to ecological propulsion systems.

Overall, the project represents an innovative approach that enables the integration of hydrogen into inland shipping while ensuring high safety standards. The authors recommend realising the concept to fully demonstrate the practicality of a CO₂-neutral propulsion system in operation and test its everyday suitability. This could serve as an incentive for further implementation of such innovative technologies, while also reducing barriers related to approval and operation by proving that this concept works in daily scheduled operations. In this context, the project can be seen as a true turning point in inland shipping, particularly in Switzerland.

1. Ausgangslage

Gemäss Kurzbeschreibung [4] sollen mit dem Projekt *Zero Emission Saphir* die Emissionen in der Binnenschifffahrt reduziert und gleichzeitig die wirtschaftlichen und betrieblichen Aspekte einer alternativen Antriebsart untersucht werden. Im Rahmen eines Pilotprojekts wird das Schiff *MS Saphir* zum ersten wasserstoffbetriebenen Passagierschiff im fahrplanmässigen Einsatz der Schweiz umgebaut. Der grüne Wasserstoff wird in der Region aus Wasserkraft hergestellt. Das Projekt soll als Modell und Machbarkeitsstudie für zukünftige Entwicklungen dienen. In der ersten Phase des Projektes liegt der Fokus auf der Schaffung einer Grundlage für die zukünftige Integration von Wasserstoff als Energieträger für Binnenschiffe in der Schweiz. Dies erfordert die erstmalige Anwendung einer risikobasierten Zulassung unter Einbezug des BAV und einer anerkannten Klassifikationsgesellschaft¹. Bei der Auswahl von Komponenten und Sicherheitsfunktionen sollen Standards geschaffen werden, welche die Auslegung zukünftiger Schiffsumbauten sowie Neubauten mit dieser Antriebstechnologie, respektive diesem Treibstoff, vereinfachen sollen. Das Basis Design der Komponenten, des Wasserstoffspeichers, der Brennstoffzelle und die Systemsteuerungen fliessen als Entscheidungsgrundlage zur Machbarkeit ein und bilden die Basis für die darauffolgende Detaillierung und Umsetzung. In einem weiteren Schritt sollen die Daten aus dem Betrieb analysiert und mit den Simulationen verglichen werden, um die Prognosen für zukünftige Projekte verbessern zu können.

2. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieses Projektes ist es, die wesentlichen Eckpunkte, Vorgehen, Sicherheitsvorgaben und ökologischen, wie auch ökonomischen Grundlagen zur Umrüstung der *MS Saphir* auf einen wasserstoffbetriebenen Antrieb zu erarbeiten. Neben dem effektiven Nutzen dieses Wissens in Bezug auf den eigentlichen Umbau, sollen die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse helfen, eine mögliche Stossrichtung zur nachhaltigen Entwicklung der Binnenschifffahrt in der Schweiz aufzuzeigen und konkrete Vorgehensschritte oder Systemmöglichkeiten für zukünftige Um- oder Neubauten darzustellen. Dies im Sinne möglicher Skalierungen der gewonnenen Erkenntnisse auf kleinere oder grössere Schiffe bei ähnlichem Schiffseinsatz. Dabei soll unter anderem auch das Potenzial der CO₂-Reduktion durch die neue Antriebstechnologie im Vergleich zu konventionellen Antriebsmethoden analysiert werden. Die Untersuchung soll aufzeigen, inwieweit durch den Einsatz von grünem Wasserstoff eine signifikante Verringerung der Emissionen erreicht werden kann und welche Auswirkungen dies auf die ökologische Nachhaltigkeit hat.

Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist die Prüfung der technischen Machbarkeit der Integration eines Wasserstoffsystems in ein bestehendes Schiff. Dabei werden die Herausforderungen der Umrüstung, die Auswahl geeigneter Komponenten sowie die Anpassung der Schiffsinfrastruktur betrachtet. Die erarbeiteten Erkenntnisse können danach als Entscheidungsgrundlage für zukünftige Schiffsumrüstungen dienen und ermöglichen eine Bewertung der Praktikabilität dieser Technologie für die Binnenschifffahrt in der Schweiz.

¹ Der IACS zugehörige Klassen gelten als anerkannt.

Ein weiteres wesentliches Ziel ist die Klärung der regulatorischen Rahmenbedingungen für die Zulassung eines wasserstoffbetriebenen Schiffes in der Schweiz. Da es sich um das erste Schiff dieser Art in der Schweiz handelt, müssen neue Verfahren im Rahmen einer, im internationalen Kontext bereits standardisierten aber noch nicht in der Schweiz durchgeführten, risikobasierten Zulassung eines Schiffes entwickelt werden. Dies beinhaltet die Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) sowie einer anerkannten Klassifikationsgesellschaft, um die rechtlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen zu erfüllen.

In der Schweizer Binnenschifffahrt werden Schiffe nach etwa 30 Jahren modernisiert und anschliessend weiter betrieben. Die Arbeit soll daher eine Einschätzung geben, ob und in welchem Umfang die entwickelte Technologie bei anderen bestehenden Schiffen angewendet werden kann und welche wirtschaftlichen und technischen Faktoren dabei berücksichtigt werden müssen.

Zusammenfassend erörtert dieses Projekt und die im Anschluss an den Umbau von *MS Saphir* geplante, ausführliche Auswertung der Daten aus dem zukünftigen Betrieb, eine umfassende Analyse der ökonomischen und ökologischen Aspekte des Umbaus, respektive der neuen Technologie. Die Ergebnisse, welche am Ende des folgenden Umsetzungsprojektes eine umfassende Grundlage für weitere Entwicklungen im Bereich der emissionsfreien Schifffahrt darstellen, werden fundierte und empirisch validierte Grundlagen für zukünftige Projekte zur Dekarbonisierung der Binnenschifffahrt in der Schweiz liefern.

Folgende Ziele wurde für diese Projekt im Kurzbeschrieb [4] formulierten:

- Erarbeitung einer Basis für die Zulassung von Schiffen in der Schweiz mit einer risikobasierten Zulassungsmethode
- Erarbeitung von Standards im Binnenschiffbau für Wasserstoff Komponenten und Sicherheitsfunktionen
- Erstellung eines Basisdesigns für die Wasserstoffspeicherung auf einem Schiff
- Analyse der ökonomischen und ökologischen Aspekte des Umbaus und zukünftigen Betriebes

3. Auslegung des Schiffes und Zulassung

Grundlage für Wasserstoff-Integration mit risikobasierter Zulassungsmethode

Da für die Zulassung von Wasserstoff als Treibstoff in Schiffen keine präskriptiven Regeln existieren (weder nationale noch internationale), muss die Zertifizierung als Fahrgastschiff in enger Abstimmung mit den Behörden erfolgen. In der Schweiz ist das BAV zulassende Behörde für Fahrgastschiffe. Gemeinsam mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) wurde entschieden für den Wasserstoffteil der Integration fachliche Expertise für die Bewertung der Konzepte und die Zulassung beizuziehen. Für diese Aufgabe wurde die international anerkannten Klassifikationsgesellschaft Lloyds Register (LR), kurz Klasse beauftragt.

LR gilt aktuell als führend in der Zulassung von alternativen Kraftstoffen in der Binnenschifffahrt. Anwendung findet der von LR entwickelte und etablierte risikobasierte Zulassungsprozess, kurz RBC² [5], siehe Abbildung 1. Der RBC-Prozess von LR ist konsistent mit und folgt den internationalen Regeln der IMO für Alternative Design gemäss den erlassenen IMO-Richtlinien 1455 [6], 1002 [7] und 1212 [8]. Der RBC-Prozess ist ein Verfahren zur umfassenden Risikoabschätzung und eignet sich daher, um technische und betriebliche Dinge zu bewerten und zuzulassen, welche von Vorschriften abweichen, neu sind oder zielbasierte Regeln und Leitlinien erfüllen müssen, z. B. für Schiffe mit speziellen Kraftstoffen (alternatives Design).

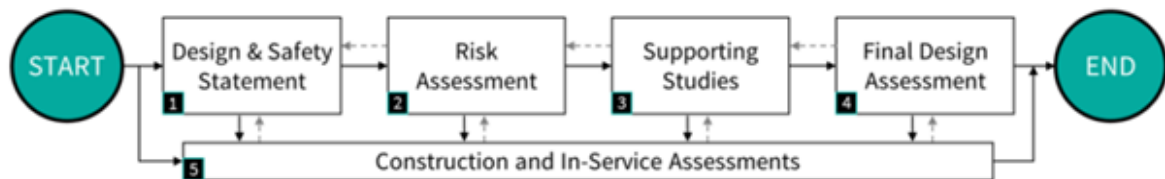


Abbildung 1: Risk Based Certification (RBC) Prozess

Dies wird unter anderem in dem IGC-Code [9] geregelt. Ziel der Abschätzung ist es, nachzuweisen, dass sowohl Risiken für Personen als auch die übrigen Anforderungen der Klasse oder der zuständigen Behörde als akzeptabel eingestuft werden können. Dabei werden Maßnahmen zur Risikobegrenzung in Konstruktion, Bau und Betrieb und Anforderungen an eine sichere Installation, Wartung und Inspektion berücksichtigt. Diese Aspekte bilden die Grundlage der risikobasierten Zertifizierung. Ein alternativer Ansatz bedeutet, dass in begründeten Fällen von den geltenden Vorschriften abgewichen werden kann. Ohne die Abweichungen wäre die Entwicklung und Erprobung einer neuen Technologie, wie in diesem Fall der Einsatz von Wasserstoff auf einem Fahrgastschiff, nicht möglich.

Der RBC-Prozess nach LR verlangt, dass alle relevanten Parteien (z.B. BAV, Lieferanten der Hauptkomponenten, Betreiber, die Klasse selbst, usw.) in den Prozess involviert sind. Es sind Arbeitstreffen vorgesehen, an welchen sämtliche Parteien nach Möglichkeit physisch teilnehmen. Nur so kann sichergestellt werden, dass alle Beteiligten ihre Ansichten einbringen können, um ein gemeinsames Verständnis des Designs und des RBC-Prozesses zu erhalten. So kann erreicht werden, dass die Vorgaben bzgl. Sicherheit und die Anforderungen aller Beteiligten erfüllt werden. Dieses Vorgehen stellt ein Novum dar, da dies das erste Schiffbauprojekt in der Schweiz ist, welches diesen Ansatz verfolgt und von dem üblichen Zulassungsverfahren mit präskriptiven Regeln abweicht.

Wie vorgesehen, wurden die mehrtägigen Workshops (PAR³ und HAZID⁴) durchgeführt und der nächste mehrtägig Workshop zum Anschluss von RBC3, der HAZOP-Workshop ist Mitte März 2025 angesetzt.

² Risk Based Certification, Zulassungsprozess von LR.

³ Preliminary Appraisal of Rules: legt fest, welche Vorschriften angewendet werden.

⁴ Hazard Identification: Identifikation, Bestimmung des Schweregrades und der Eintretenswahrscheinlichkeit aller möglichen Gefahren.

Der Prozess sieht fünf Schritte bis zur Zulassung vor, wovon die ersten zwei Schritte mittlerweile abgeschlossen wurden. Schritt drei erfolgt bis Mitte März 2025, Schritt vier und fünf erfolgen parallel zu der Detailplanung resp. dem Umbau. Der Abschluss des *RBC-2 Risk Assessments* wurde im Juni 2024 von LR mit einem *Approval in Principle* (AiP) bescheinigt. Dieses Zertifikat (siehe Anhang) bestätigt, dass der gewählte Design-Ansatz von der Klasse geprüft wurde und den Anforderungen entspricht.

Gleich zu Beginn des Prozesses wurde, um Regel-Konflikte und mehrfach Abdeckungen zu vermeiden, eine Vergleichs-Studie zu den aktuellen Schweizer Schiffbau Vorschriften (SBV [10] und AB-SBV [11]) gegenüber dem Regelwerk von LR erstellt. Dies schaffte eine Übersicht über die teils relevante Gesetzgebung und Spezialitäten, welche es im weiteren Prozess zu beachten gilt. Im PAR-Workshop wurde festgelegt, für welche Vorschriften und Sicherheitsbedürfnisse ein alternativer Ansatz gewählt wird. Für die geplanten Abweichungen wurden im HAZID Workshop alle möglichen Risiken erfasst und deren Eintretenswahrscheinlichkeit und Folgeschwere quantifiziert. Die Risiken wurden gemäss dem RBC-Prozess in einer Matrix eingeordnet und bewertet. Es wurde aufgezeigt, dass die Risiken so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel (im englischen bezeichnet als ALARP⁵) sind. Die aus dem HAZID Workshop resultierenden Massnahmen zur Verifizierung getroffener Annahmen und verwendeten Technologien befinden sich momentan in Bearbeitung (RBC3) und münden im *Final Design Assessment* (RBC4), der Freigabe für den Bauprozess.

Brennstoffzellen System

Auf den Schweizer Seen mit deren Gewässertopografie sind im internationalen Vergleich eher kleinere Schiffe zu finden. Aufgrund der geringen Tiefgänge und kleinen Seitenhöhen, haben die Unterdeckräume im Mittschiffbereich durchschnittlich knapp Stehhöhe, im vorderen und hinteren Bereich deutlich weniger. Auch sind die Nenn-Antriebsleistungen der Schweizer Binnenschiffe eher gering im internationalen Vergleich, was auf die kurzen Distanzen und die vergleichbar geringeren Gewichte der Schiffe zurückzuführen sind.

Aus diesen Gründen ist die Shiptec eine strategische Partnerschaft mit einem führenden Brennstoffzellen Produzenten eingegangen und hat gemeinsam, in enger Kooperation ein Modul entwickelt, welches den Anforderungen des Schweizer Binnenschiffmarktes entspricht. Bei der Konzipierung der Einheit wurde darauf geachtet, dass eine Skalierung der Grösse des Systems möglich ist, um die Integration in einem kleinen Raum, respektive Schiff zu ermöglichen. Das heisst auch, dass die verschiedenen, relativ kleinen Leistungsanforderungen in ähnlichen Schiffen präziser und günstiger abgedeckt werden können als beim Einsatz bestehender Standardmodule, welche meist bzgl. Grösse und Leistung nicht optimal in den betroffenen Schiffen eingesetzt werden können.

⁵ Definition gemäss RBC Prozes «as low as reasonably practicable (ALARP) », welche die gleiche Bedeutung hat wie die Definition gemäss IGF Code «mitigated as necessary».

Die Wahl eines kompakten, modularen Brennstoffzellenmoduls erlaubt es, je nach Leistungsbedarf, mehrere Einheiten unabhängig voneinander in einem oder mehreren Modulen unterzubringen. Dies ist ein wichtiger Faktor, um grössere Umbaumassnahmen an bestehenden Strukturen und dadurch entstehende, zusätzliche Kosten zu verhindern, was wiederum eine Skalierbarkeit des Konzepts begünstigt.

Wasserstoffsystem und Sicherheitssysteme

Die Speicherung von Wasserstoff in Drucktanks sowie die Betankung und Steuerung des gesamten Wasserstoffsystems stellen aufgrund der hohen Drücke (bis zu 350bar) und den strengen Sicherheitsanforderungen eine erhebliche technische Herausforderung dar. Ziel ist die Entwicklung eines Systems voranzutreiben, das eine äquivalente Sicherheit im Vergleich zu den bisher etablierten Technologien aufweist, mit wenigen Komponenten auskommt (um potenzielle Leckagestellen zu minimieren) und optimal in die bestehende Struktur integriert werden kann.

Eine besondere Schwierigkeit liegt bei der Unterbringung der Drucktanks in einem geschlossenen Raum unter Deck. Im Gegensatz zu vielen anderen Projekten, bei denen die Tanks an offenen natürlich belüfteten Standorten installiert werden, war dies hier aus Gründen der Gewichtsverteilung, der Stabilität des Schiffes, sowie der begrenzten Platzverhältnisse im Aufbau und Dachbereich nicht realisierbar. Diese Konstellation stellt eine grosse Herausforderung dar, deren erfolgreiche Lösung ein richtungsweisender Ansatz für die Integration von Wasserstoffsystemen, insbesondere in bestehenden Schiffen im europäischen Binnenmarkt sein könnte.

Die Gewährleistung der Sicherheit erfolgt durch eine sorgfältig konzipierte Integration der Drucktanks unter Deck, welche durch eine Kombination aus aktiven und passiven Sicherheitssystemen ergänzt wird. Die geplanten Sicherheitssysteme umfassen unter anderem eine redundante Lüftung, deren Auslegung und Konstruktion mittels CFD⁶ Simulation erfolgte, um die Anforderungen der IEC 60079-10 zu erfüllen, sowie TPRD⁷ Sicherheitsventile, welche den Druck aus den Wasserstofftanks bei Überschreiten einer kritischen Temperatur (110°C) kontrolliert, über ein Leitungssystem ins Freie ablassen. Eine kontinuierliche Überwachung des Systems durch diverse Druck-, Temperatur- und Wasserstoffsensoren ist gewährleistet.

Im Falle der Detektion von Abweichungen von den Sollwerten, erfolgt eine sofortige Abschaltung der Brennstoffzelle sowie eine Schliessung der Tankventile, welche direkt auf den einzelnen Tanks installiert sind. Dies dient der Minimierung der Menge an Wasserstoff, welche bei einem Leck in den Leitungen austreten kann. Das Gesamtkonzept wurde im Rahmen des AiP von der Klassifikationsgesellschaft sowie dem BAV genehmigt. Im Rahmen des RBC2-Workshops konnte nachgewiesen werden, dass bei einer Installation von Wasserstoff-Drucktanks

⁶ Computational Fluid Dynamics (CFD) ist die Analyse von Fluidströmungen mit Hilfe numerischer Lösungsverfahren.

⁷ Diese thermische Druckentlastungsvorrichtung (TPRD) wurde entwickelt, um Tanks und Behälter bei Überhitzung zu entlasten.

unter Deck, bei einem Schiffsumbau ein gleichwertiges Sicherheitsniveau wie bei einem Schiff mit konventionellem Antrieb gewährleistet werden kann.

Weiterführende, detaillierte Untersuchungen des Systems inklusive der Sicherheitsvorkehrungen sind Bestandteil des Zulassungsprozesses gemäß den Anforderungen der Richtlinie RBC3.

Ein offener und noch zu klärender Punkt ist die Notwendigkeit sowie die Definition der periodischen Inspektion der Wasserstoffspeichertanks. Dies vor allem auch unter Berücksichtigung des Aufstellungsort / Umgebung, in welcher die Tanks installiert werden und unter Berücksichtigung, bestehender Schweizer Normen, welche z.T. von internationalen Vorgaben abweichen. Im nächsten Schritt der Zulassung mit der Klasse, welche parallel zur Detail Planung und Beschaffung von Komponenten läuft, werden diese Anforderungen geklärt und ausführlich beschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass gemäss dem Ansatz der risikobasierten Zulassung eine Abweichung von Schweizer Normen und Vorgaben einerseits zulässig, andererseits voraussichtlich nötig ist. Dies kann und soll im Rahmen des ALARP Prinzips geschehen und sich v.a. an internationale Vorgaben und Normen halten. Insbesondere, weil internationale Normen und Vorgaben bestehen, gemäss denen die Wasserstoff Drucktanks selbst gebaut und auch regelmässig überprüft werden. Die definitive Klärung hierfür sind Teil der Stufe RBC5 im risikobasierten Zulassung Prozess (siehe Abbildung 1).

Antriebskonzept

Das momentan verbaute Antriebssystem des MS Saphir besteht aus einem seriellen Hybrid, wobei von einer Dieselgeneratoren Gruppe Strom erzeugt wird, welcher die elektrischen Antriebsmotoren speist. Der variierende Energiebedarf wird durch das Zu- und Abschalten von einzelnen Generatoren abgedeckt und die Dynamik wird mit der Drehzahlvariation der Generatoren abgefangen. Eine nähere Untersuchung der Elektrokomponenten des bestehenden, seriellen Hybridsystems hat ergeben, dass die Integration von Komponenten, mit einer Lebensdauer von mehr als 12 Jahren in ein neues Energie- und Power Management System (EPMS), sowohl teilweise technisch nicht möglich als auch wirtschaftlich nicht mehr tragbar ist. Gemäss K. MOIRANGTHEM [12] ist für Dieselgeneratoren von einer üblichen Lebensdauer von rund 10 Jahren auszugehen. Auf Basis dieser Untersuchung wurde entschieden, auch mit Blick auf die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme, die ganze Energieversorgung und sämtliche elektrischen Antriebskomponenten zu ersetzen.

Beim MS Saphir wird, wie im vorherigen Absatz beschrieben, das bestehende EPMS durch ein neues, von Shiptec entwickeltes EPMS ersetzt. Die Weiterentwicklung basiert auf dem EPMS, welches Shiptec für rein elektrische Schiffe (z.B. eMS Rütli) bereits erfolgreich im Einsatz hat und ermöglicht es, eine Brennstoffzelle als Energiequelle zu integrieren, wobei diese für das hier beschriebene Projekt im Sinne der Sicherheit als Reichweite vergrößernd⁸ zu betrachten ist. Die Auslegung des Energiesystems wird im Kapitel Optimierung Energiesystem mit Simulation beschrieben.

Durch die oben beschriebene Integration der Brennstoffzelle in das EPMS, respektive das (batterie-) elektrische Antriebssystem, kann das Antriebssystem bzw. das Schiff auch ohne die Leistung der Brennstoffzelle betrieben werden. Die Reichweite würde sich durch den Wegfall der Brennstoffzelle deutlich reduzieren, jedoch wäre immer noch eine Mindestreichweite (Batteriekapazität) vorhanden, um den nächsten Liegeplatz sicher erreichen zu können.

Basisauslegung Elektrisches System

Als Grundlage für die Planung des elektrischen Energie- und Antriebssystems dient das Single Line Diagramm (siehe Abbildung 7 im Anhang). Dieses wurde zu Beginn des Projektes auf Basis der, von Shiptec mehrfach eingesetzten Architektur entwickelt und im Verlauf der Arbeiten ergänzt bzw. so weit erweitert, dass eine Brennstoffzelle als zusätzliche Quelle (wie ein Dieselgenerator) integriert werden kann. Es handelt sich bei diesem System nicht um eine Neuentwicklung, sondern um einen weiteren Entwicklungsschritt. Basierend auf dem Single Line Diagramm als Grobkonzept, wurde eine verfeinerte Planung zur Bestimmung der neuen Komponenten ausgeführt. Die Kabelführung wurde für alle essenziellen Systeme redundant ausgelegt, entsprechen den Vorgaben der ESTI Weisung Nr. 607 / Version 0824, respektive der IEC 60092.

Für die Steuerung wird das bestehende Shiptec-EPMS inkl. der bereits erprobten Redundanzen verwendet. Es sind zwei CPUs in zwei unterschiedlichen Schaltschränken verbaut, sodass eine hohe Sicherheit gegenüber einem Ausfall gewährleistet werden kann. Alle lokalen EPMS-Steuerungskomponenten sind durch eine redundante Ringverkabelung verbunden und überwachen bzw. steuern alle Systeme inklusive die beiden, vom EPMS mehrheitlich unabhängig agierenden Steuerungen für die Brennstoffzelle und der Wasserstofftankbewirtschaftung.

⁸ System zum Erhöhen der Reichweite, in diesem Fall nur im Kontext der Sicherheit, da das Schiff auch ohne Brennstoffzelle fahren kann. Da aber die Energie der Batterie nicht ausreichend ist für einen Tageskurs, kann dieser Begriff aus energetischer Sicht irreführend sein.

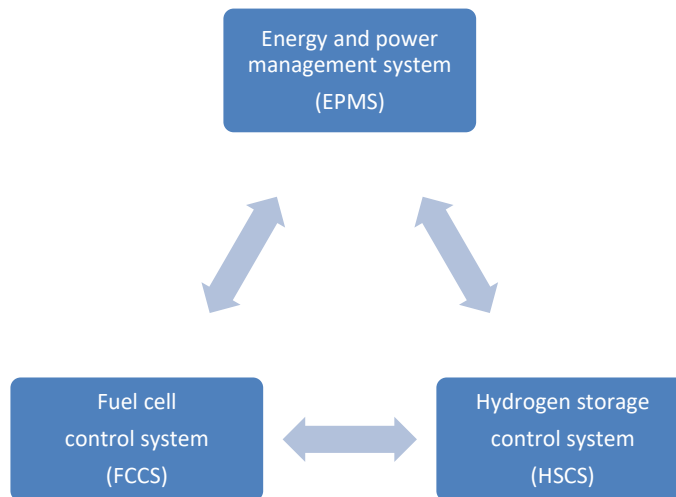


Abbildung 2: Übersicht Steuerungen

Diese unabhängigen Steuerungs- und Überwachungssysteme für die Brennstoffzelle und Wasserstoffbewirtschaftung sind in sich selbst sicher (gem. Vorgaben der Klassifikationsgesellschaft). Zwischen diesen selbstsicheren Sub-Systemen und dem EPMS gibt es eine Busverbindung für den Datenaustausch. Hierbei geht es darum Informationen über den Zustand des Brennstoffzellensystem und der Tank- und Speicheranlage zu erhalten. Aber auch damit die Brennstoffzellen als Energielieferant in das EPMS-System so einzubinden, dass diese zum Energiehaushalt des Schiffes beiträgt. Dazu müssen aktuelle Betriebs- und Statusinformationen vorhanden sein, um die Leistungsabgabe der Brennstoffzellen gezielt anzufordern und Zustände der einzelnen Komponenten weiterzugeben (u.a. Fehlermeldungen, Fehlerreaktionen, usw.).

Integration der Systeme ins Schiff

Während der Auslegung des Systems wurden die Komponenten spezifiziert und in Abstimmung mit Lieferanten definiert und zusammengestellt. Die Integration in das Schiff erfolgte iterativ in mehreren Schleifen, einschließlich Gewichtsrechnung und Momenten Bilanzierung zur Sicherstellung der hydrostatischen Stabilität. Eine Aufstellung aller Bauteile, welche ein- und ausgebaut werden, bildet die Basis der Gewichtsrechnung. Komponenten, Strukturbauteile, Leitungen und Lüftungskanäle wurden in einem 3D Modell zusammengefügt. Als Basis des existierenden Schiffes wurden die bestehenden 3D Daten mit einem 3D Scan kombiniert, welches ein etabliertes Verfahren für Schiffsumbauten bei der Shiptec darstellt.

Eine Aufstellung der Gewichte, gegliedert nach Systemen ist in der Tabelle 1 dargestellt. Das Mehrgewicht nach dem Umbau ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass das bestehende dieselelektrische Energieerzeugungssystem durch zwei Systeme (Batterie und Brennstoffzellen) ersetzt wird. Wobei das Batteriepaket, im Vergleich zum bestehenden dieselelektrischen Energieerzeugungssystem, eine deutlich niedrigere gravimetrische Energiedichte aufweist. Die Heiz- und Warmwasserleistung - aktuell von einer (Diesel-) Ölheizung abgedeckt - wird durch Wärmerückgewinnung aus der Brennstoffzelle und einer Wärmepumpe sichergestellt.

Tabelle 1: Gewichtsbilanz Umbau

Position	Gewicht [t]	Enthält
Batterie Speicher & Systeme	8.5	Ladeeinrichtung, Fundamente, Elektrische Komponenten, Raumertüchtigung, Lüftung
Brennstoffzellen System	3.5	Elektrische Komponenten, Fundamente, Lüftung, Raumertüchtigung, Brennstoffsystem, Kühlung
Wasserstoffspeicherung System	5.5	Wasserstoffsysteme, Sicherheitssysteme, Betankung Systeme, Fundamente, Raumertüchtigung, Schleuse
Wärmerückgewinnung und Heizung	2	Wärmetauscher, Systemkomponenten, Wärmepumpe, Speicher
Einbau andere Umbaumaassnahmen	5.3	Deckersatz, Raumunterteilungen, Sicherheitssysteme
Summe Einbau	24.8	Summe aller neuen Einbauten
Ausbau Dieselgenerator und Heizung	- 5.5	Ausbau aller Fundamente, Abgassysteme, Raumertüchtigung, Kühlsystem, Lüftung
Gewichtsbilanz Umbau	19.3	

Eine Aufstellung der Ladefälle (effektiver Auslegungsfall) vor und nach dem Umbau, ist in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei werden neben dem Leerschiffsgewicht auch die Fahrgäste und Betriebsstoffe berücksichtigt. In dieser Tabelle 2 ist gut ersichtlich, dass statt der ursprünglichen 5000 Liter Diesel (4600 kg), neu nach dem Umbau nur noch 100kg Wasserstoff gebunkert werden.

Tabelle 2: Schiffsverdrängung vor und nach dem Umbau

BAV Ladefall	Verdrängung MS Saphir bestehend in [t]	Verdrängung Wasserstoff Saphir in [t]
Leerschiff	107.2	126.5
Fahrgäste	22.5	22.5
Schwarzwasser (50%)	2.0	2.0
Diesel (50%)	2.3	-
Wasserstoff (50%)	-	0.05
Total	134	151.0

Zur Überprüfung der neuen Situation wurde eine Intakt- und Leckstabilität-Berechnung durchgeführt und gegenüber den geltenden Vorschriften geprüft.

Für die Abtrennung und für eine möglichst komprimierte Auslegung von wasserstoffführenden Räumen, sind mehrere zusätzliche Quer- und Längsschotte vorgesehen, welche wiederum auf die Berechnung der Leckstabilität einen Einfluss haben. Mit einer optimalen Positionierung dieser Schotten, konnte sichergestellt werden, dass trotz der höheren Gesamtverdrängung die Anforderung, insbesondere an die Leckstabilität erfüllt werden können. Um keinen negativen Einfluss auf den Schiffswiderstand durch eine Vertrimmung des Schiffes oder negative Auswirkung auf die Stabilität zu erhalten, mussten die neuen Komponenten so verteilt und Umbaumaassnahmen geplant werden, dass die Verteilung längs und quer im Schiff insgesamt neutral ausfallen.

Wasserstoff führenden Komponenten werden unter Beachtung der geltenden Vorschriften für gasförmige Treibstoffe (zurückzuführen auf den IGF-Code⁹ [7]) innerhalb der theoretischen Eindringtiefe, welche ein Fünftel der Breite und 0.8m Abstand zur Aussenhaut beträgt, aufgestellt. Dies stellt insbesondere bei Schiffen < 100m Länge eine besondere Herausforderung dar, da die Einbauhöhe im Unterdeck damit nochmals deutlich reduziert wird. Unter Einhaltung dieser Anforderungen wurde im mittleren Bereich des Unterdeckes ein Raum geschaffen, in welchem vierzehn Drucktanks mit je 350 Liter Volumen untergebracht werden können. Diese Drucktanks haben, je nach Temperaturverlauf, eine nutzbare Speichermenge von ca. 6-7kg. Direkt anschliessend an den Wasserstoff Lagerraum in Richtung Heck befindet sich der Brennstoffzellenraum. Damit können die wasserstoffführenden Leitungen kurzgehalten werden. Die Batterien und die Komponenten für die Erzeugung des Bordnetztes, sowie die Batterieladegeräte sind im vorderen Unterdeckbereich des Schiffes geplant. In dem Bereich, in dem aktuell die Dieselgeneratoren aufgestellt sind. Diese neu gestalteten Räume wurden unter Berücksichtigung von Zugänglichkeit, Wartung und Fluchtwegen neu arrangiert.

Ein bestehender Speiselift auf der Backbord Seite wird ausgebaut und in demselben Bereich auf Steuerbord Platz geschaffen, so dass die beiden Bereiche nun als Steigzonen zum Dach genutzt werden können. Darin werden die Lüftungskanäle und Druckablass-Leitungen aufs Dach geführt sowie die Betankungsleitungen, welche sich an der Bordwand an Steuerbord befinden untergebracht. Der neue Generalplan kann dem Anhang entnommen werden.

Optimierung Energiesystem mit Simulation

Das tägliche Standardfahrprofil der MS Saphir sind acht einstündige Rundfahrten im Sommerbetrieb und vier bis sechs Rundfahrten in den Zwischensaisons. Messdaten wurde im Sommer 2019 auf dem Schiff aufgezeichnet und bilden die Grundlage für die Energiesimulation. Wobei zu beachten ist, dass die MS Saphir auch für energieintensivere Ersatzkurse eingesetzt wird. Diese Kurse werden wegen ihrer starken Varianz hier nicht weiter betrachtet. Sie wurden bei der Auslegung der Anlagen und Systeme berücksichtigt und mit der hier vorgestellten Simulationmethode überprüft, weil sie für den Eigner SGV AG ein unverzichtbares Betriebsbackup darstellen. Die Ergebnisse der Ersatzkurse werden hier nicht dargestellt, da Sie nicht der Regeln entsprechen und die Optimierungen nicht für diese Kurse gemacht wurden.

Wie bereits im Kapitel Wasserstoffsystem und Sicherheitssysteme, Antriebskonzept sowie Basisauslegung elektrisches System beschrieben, wird im Projekt die Brennstoffzelle, respektive die Wasserstoffenergie als zusätzliche Energiequelle in einem bestehenden (elektrischen) System angesehen. Da die Brennstoffzelle nicht die benötigte elektrische Energie in der entsprechenden, für den Schiffsbetrieb nötigen Dynamik, bereitstellen kann, sind Batterien in einem solchen System als Leistungsspitzenabdeckung unabdingbar. Da die Speicherung von elektrischer Energie in Batterien, wegen der nicht vorhandenen Umwandlungsverluste effizienter ist,

⁹ International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels.

als die Umwandlung von Wasserstoff in der Brennstoffzelle, machte es Sinn, möglichst viel elektrische Energie direkt in Batterien zu speichern.

Aktuell ist die maximal mögliche Energiemenge, welche in der Batterie gespeichert werden kann, aufgrund der bestehenden Landanschlüssen und der beschränkten Platz- und Gewichtsverhältnisse begrenzt. Es kann also einerseits nur so viel elektrische Energie in Batterien gespeichert werden, wie die Randbedingungen es zulassen, andererseits soll so viel elektrische Energie direkt verwendet werden, wie möglich. Im Falle von der MS Saphir wurde die übertragbare Energie während der Stillstandzeit über Nacht mit einem 125A bei 400VAC (50Hz) Landanschluss, inkl. Wirkungsgrad berechnet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Grundlast der eigenen Systeme (im Schiffbau als Bordnetzlast bezeichnet) durchgehend abgedeckt und von der theoretisch zur Verfügung stehenden Ladeleistung abgezogen werden muss.

Ausgehend von den technischen Bedingungen und der Standardfahrprofile (inkl. Bordnetzverbrauch), sowie bekannten Ausnahmen im Betrieb¹⁰, wurde ein Simulationsmodell aufgesetzt, welches unter Berücksichtigung aller bekannten Systemparameter (u.a. Wirkungsgrade der verschiedenen Komponenten), Resultate zum besten und effizientesten Betrieb der Brennstoffzelle, wie auch zum Wasserstoffverbrauch über einen Tag liefert. Grundsätzlich wird hier eine diskrete Energiebilanzbetrachtung des gesamten Systems abgebildet. Es werden alle Quellen, Senken und Speicher in diesem diskreten Modell über einen gesamten Tag (24h) betrachtet, wobei als Startpunkt, zum Beginn des Betriebs am Morgen, immer von einer vollen Batterie ausgegangen wird. Nach dem Start des Betriebs wird somit von der vollen Batterie die elektrische Energie bezogen, welche unter bestimmten Bedingungen (Zeit nach Start und min. SOC) durch Energie, respektive Leistung der Brennstoffzelle kompensiert wird. Mit iterativen Berechnungsschritten wird der SOC-Wert der Batterie am Ende des Tages auf den Zielwert 20% SOC angenähert. Die Eingangsparameter für die Simulation sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Eingangsparameter für die Simulation

Parameter	Wert
Strom am Landanschluss	125 A
Ladespannung am Landanschluss	400 VAC
Dynamikreserve am Landstrom	10 kW
Bordnetz während der Nacht	8 kW
Nennleistung Brennstoffzelle	135kW
Wirkungsgrad Brennstoffzelle	45%
Optimaler Betriebszustand Brennstoffzelle	50% Last
Energiedichte Wasserstoff	33.33 kWh/kg
Netto Batteriekapazität	640 kWh
DOD Maximum bezogen auf Bruttoenergie	80%
SOC Minimum	20%

Zusätzlich zu den physikalischen Anfangsbedingungen wurden die in der Tabelle 4 ausgewiesenen Wirkungsgradwerte mit in die Simulation integriert.

¹⁰ Die Fahrprofile von MS Saphir wurden über Jahre aufgezeichnet, sodass eine sehr gute Datenbasis zum Erstellen von Standardprofilen und Ausnahmen zur Verfügung steht.

Tabelle 4: Wirkungsgrade in der Simulation

Komponente	Wirkungsgrad	Teilsystem
Bordnetzwechselrichter/Lader	98%	Bordnetz/Laden
Bordnetzfilter	97%	Bordnetz/Laden
Antriebswechselrichter	98%	Antrieb
Motor	97%	Antrieb
Kabel Bordnetz	99%	Bordnetz/Laden
Kabel Antrieb	98.5%	Antrieb
Brennstoffzelle	45%	Brennstoffzelle
Brennstoffzellenumrichter	98%	Brennstoffzelle
Batterieladung	95%	Batteriesystem
Batterieentladung	98%	Batteriesystem

Abbildung 3 stellt die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Simulation grafisch dar. Die oberste Grafik (blau) zeigt die Leistungskurve des Antriebssystems einschließlich der Bordnetzlast. Diese basiert auf realen Messwerten, die während des Betriebs der MS Saphir erfasst wurden und als Grundlage für die gesamte Auslegung dienen.

In der zweiten Grafik (grün) wird die Leistung der Brennstoffzelle, in der dritten (rot) die Leistung der Batterie dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Brennstoffzelle die Grundlast übernimmt, während die Batterie für die dynamische Leistungsanforderung des Systems zuständig ist. Diese Systemintegration wurde gezielt so ausgelegt, dass die Lebensdauer der Brennstoffzelle maximiert wird, da gleichmässige Lastprofile Degradationsprozesse reduzieren und dadurch die langfristige Leistungsfähigkeit erhalten bleibt.

Die vierte Grafik (schwarz) zeigt den Verlauf des State of Charge (SOC) der Batterie über einen Tageszyklus. Hierbei ist ersichtlich, dass die Batterie im Bereich zwischen 20 % und 80 % SOC betrieben wird, was ebenfalls der Lebensdaueroptimierung dient.

Es ist ersichtlich, dass die installierte Brennstoffzellenleistung nahezu durchgehend während des Betriebs abgerufen werden muss, um in Kombination mit der zuvor festgelegten Batteriekapazität den Gesamtenergiebedarf der MS Saphir decken zu können.



Abbildung 3: Simulation von einen Tag mit 8 Rundfahrten

Die Ergebnisse der Simulation sind in der Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse aus der Simulation

Parameter	Wert
Ladezeit	9.3 h
Effektive Ladeleistung	68 kW
Theoretische Ladeenergie	638 kWh
Anfangsenergie inkl. aller Wirkungsgrade	588 kWh
Gesamtenergieverbrauch pro Tag	1021 kWh
Energieproduktion Brennstoffzelle	600 kWh
Wasserstoffverbrauch pro Tag	40 kg
Autonomie ohne Nachtanken bei 100kg	2.5 Tage
Max. Brennstoffzellenleistung zum Erreichen des min. angestrebten SOC	47.25kW
Energieverbrauch Batterie	428 kWh
min. SOC (bezogen auf Bruttoenergie)	20%
Max Entlade C-Rate	0.32
Max Lade C-Rate	0.08

Die Simulationsergebnisse wurden mit einer schrittweisen mathematischen Approximation berechnet. Die oben dargestellten Werte zeigen das Endergebnis für den Betrieb mit acht Kursfahrten pro Tag, wie sie im Sommer üblicherweise gefahren werden. Es wurde bei der Auslegung und im Simulationsbetrieb darauf geachtet, dass verschiedene technische Grenzwerte (z.B. min. SOC am Ende des Tages oder die max. möglichen C-Raten) eingehalten werden.

Zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse werden zwei Berechnungen vorgenommen und die Resultate verglichen:

- Der berechnete Gesamtenergieverbrauch pro Tag von 1021 kWh umgerechnet auf den Dieselverbrauch (heutiger Systemwirkungsgrad ca. 86% und Dieselwirkungsgrad ca. 35%) ergibt einen theoretischen Dieselverbrauch von 2.6 L/km. Die langjährige Statistik der SGV AG für die MS Saphir (Verbräuche 2019-2024) weist einen Verbrauch von 2.56L/km aus.
- Der berechnete Energieverbrauch pro Tag von 1021 kWh dividiert durch den Systemwirkungsgrad von ca. 0.90 (Batterie zu Motor/Bordnetz und Brennstoffzelle (elektrisch) zu Motor/Bordnetz), so wird von den Quellen (Batterie und/oder Brennstoffzelle) 1134kWh elektrische Energie benötigt. Dies ist nahe an der Summe Batterieenergie + Brennstoffzellenenergie (588kWh + 600kWh) = 1188kWh.

Systemvergleich Wasserstoff Hybrid gegenüber Batterie

Mit der in diesem Projekt erarbeiteten Basisauslegung des batterieelektrischen Systems mit Wasserstoff Brennstoffzellen Erweiterung ist es möglich, eine Skalierung der Systeme für einen zunehmenden Energiebedarf vorzunehmen. Weil das Hybridsystem eine Kombination zweier Systeme ist, kann die theoretische Skalierung sowohl für ein Wasserstoff-Hybrid-System als auch für ein reines Batterie System durchgeführt werden. Der gewählte Aufbau des Batteriesystems (Strings und Module), unter Berücksichtigung von Reserven und Speicherkapazität-Verringerung über die Lebensdauer, ergibt eine Nettoenergiemenge von 640 kWh. Dies entspricht im aktuellen Fall auch der Menge, welche mit einem 125 A Anschluss über Nacht geladen werden kann. Für die Skalierung wird der gewählte Batteriespeicher mit 640 kWh jeweils vervielfacht, welches den dargestellten Schritten in der Abbildung 4 entspricht. Der erste Vergleichspunkt ergibt sich somit mit 1280 kWh, mit welchem der Tagesbedarf im Regelkurs von 1050 kWh inkl. Reserve abgedeckt werden kann. Die gespeicherte Energie für die tatsächlich gewählten Speicher (100 kg Wasserstoff und 640 kWh Batteriespeicher) beträgt 2150 kWh und wird zusätzlich zu den 640 kWh Schritten dargestellt. Wie im Kapitel Optimierung Energiesystem mit Simulation beschrieben, ist die effektive Energiespeichermenge aufgrund der Ersatzkurse höher gewählt als der Tagesbedarf im Regelkurs.

Mit Hilfe dieser Skalier Methode kann somit der Platzbedarf und damit verbunden die Anzahl benötigter Räume wie auch die dafür notwendigen Systemgewichte ermittelt werden. Für den Wasserstoffspeicher wurden entsprechend der Erhöhung der Energiemenge, die Anzahl Wasserstoff Tanks erhöht und im Layout überprüft, wann ein weiterer Raum für die Unterbringung vorzusehen ist. Anhand der Anzahl benötigter Komponenten wurden die verschiedenen Massen für die unterschiedlichen Systeme berechnet.

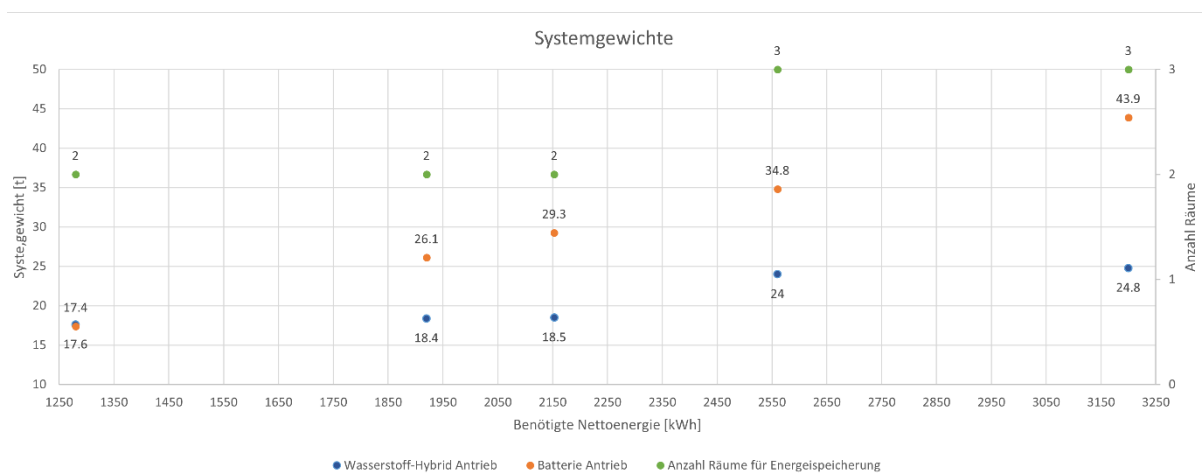


Abbildung 4: Systemgewichte und Zusammenhang mit Anzahl Räumen mit zunehmender Nettoenergiemenge

In Abbildung 4 werden Systemgewichte in Tonnen (linke Y-Achse) und deren Unterbringung in Anzahl Räumen (rechte Y-Achse) für mehrere Nettoenergiemengen (X-Achse) dargestellt. Bei einer gespeicherten Energiemenge von 1280 kWh sind die beiden Antriebsalternativen gleich schwer. Wegen der Grösse der Komponenten sind bei beiden Alternativen zwei Unterdeckräume für die Unterbringung der Energiespeicher notwendig. Um das Schiff mit elektrischer

Energie aus Wasserstoff zu versorgen, wird bereits bei einer sehr geringen Menge Wasserstoff ein komplexes System mit vielen Komponenten benötigt. Erhöht man nun die Anzahl der Tanks, in einem dafür vorgesehenen Raum, wird die Gewichtszunahme vom Eigengewicht des Tanks dominiert. Ab einer benötigten Energiemenge von mehr als 1300 kWh, ist die Wasserstoff-Hybrid-Alternative bzgl. Gewicht dem Batteriespeicher überlegen. Wird mehr als 2150 kWh Energie benötigt sind mehr als zwei Räume notwendig um die Energiespeicher unter zu bringen. Dies wirkt sich deutlich auf das Gewicht des Wasserstoff Systems aus, da die Ertüchtigung eines Raumes für die Lagerung von Wasserstofftanks Mehrgewicht zur Folge hat. Im Gegensatz dazu steigt das System Gewicht der Batterien bei zunehmender Energiemenge fast linear, dominiert von dem eigentlichen Batteriegewicht. Zusatzsysteme, um einen weiteren Raum für die Aufstellung von Batterien zu ertüchtigen, fallen dabei kaum merklich ins Gewicht.

Für beide betrachtete Alternativen ist neben dem Schiffsumbau auch ein Landinfrastruktur Ausbau vorzunehmen. Für die Wasserstoff-Hybrid Antriebsalternative ist eine Wasserstoff Betankungsanlage notwendig. Für die Batterie Antriebsalternative (welche hier als Vergleich herangezogen wird) wäre ein Ausbau der Landanschlüsse notwendig. Aktuell sind einige Steganlagen der SGV für das Laden der Schiffe mit je einem 125A bei 400 VAC Anschluss ausgestattet. Da das vorgesehene Wasserstoff Hybrid System auf einen vorhandenen Landanschluss ausgelegt wurde, ist kein Ausbau der Anschlüsse notwendig.

Die aktuelle Auslegung (Batterie und Wasserstoff) ermöglicht eine Energiebereitstellung von rund 2150 kWh. Damit ist eine Wasserstoffautonomie von 2-3 Tagen (je nach saisonalem Kurs) möglich, oder dass neben dem Betrieb im Regulären Kurs (z.B. 8 Fahrten) ein Sonderbetrieb (mit zusätzlichen Extrafahrten) oder ein Einsatz für einen (zusätzlichen) Ersatzkurs, z.B. auf den SGV-Hauptstrecken möglich ist. Der Einsatz des Schiffes in verschiedenen Kursen und Extrafahrten ist für den Betreiber notwendig. Die Ausstattung der MS Saphir mit einem Batteriespeicher Kapazität von 2150 kWh, gleichgross wie die geplante hybride Ausführung, ist aus Gewichtsgründen nicht möglich. Eine Lösung mit einem rein elektrischen Energiespeicher stellt daher keine Option dar.

Einfluss auf den Betrieb

Nach dem Umbau unterscheidet sich die Bedienung des Schiffes für die nautische Crew nicht wesentlich, da die Systeme mehrheitlich automatisch arbeiten. Verglichen mit der heutigen Bedienung der MS Saphir kann gesagt werden, dass sich die Handhabung in Zukunft eher einfacher gestaltet. Der Schiffsführer sollte jedoch, insbesondere zum Ende des Tagesfahrplanes, den SOC-Tiefstwert und den verbleibenden Wasserstoffvorrat (Druck) beachten. Aufgrund der Energieoptimierung soll der Batteriespeicher optimalerweise so gut wie möglich ausgenutzt werden, was die Gesamteffizienz des Systems erhöht.

Treten aussergewöhnliche Umstände, wie raues Wetter und Seegang oder andere Faktoren auf, welche eine erhöhte Leistungsanforderung bewirken, erfordert dies allenfalls eine kurzfristige Anpassung der Betriebsweise oder eine kurzfristige, automatische oder semiautomatische Erhöhung der Brennstoffzellenleistung. Das Alarm Management der Systeme erfordert

eine Schulung des Personals, um korrekt auf Fehlermeldungen reagieren zu können. Grundsätzlich folgt das Gesamtsystem dem Ansatz, dass beim Auftreten eines Fehlers im Wasserstoffsystem, die betroffenen Systeme heruntergefahren, die Wasserstoffzufuhr gestoppt wird und in einen Sicherheitsmodus versetzt werden. In diesem Fall kann es erforderlich sein, dass der nächstgelegene Steg angefahren werden muss, bis ein Techniker das System wieder in den Normalzustand versetzen kann. Dieses Vorgehen stellt einen wichtigen Aspekt der Sicherheit dar.

Das Betankungsintervall beträgt heute für Diesel rund sieben Tage. Mit der Umstellung auf Wasserstoff wird sich dieses auf zwei bis drei Tage, je nach Anzahl Fahrten reduzieren. Da der Betankungsvorgang deutlich länger als bei konventionellen Dieselschiffen dauert, wird ein Steg für die Betankung vom Wasserstoff vorgesehen, welcher den Betrieb der anderen Schiffe nicht einschränkt.

Betankung, Wasserstoffproduktion und Logistik

Im ursprünglichen Projektplan war es vorgesehen, die Tankstelle mit einem Tankstellenpartner zu realisieren. Dieser Partner hatte geplant eine Strassentankstelle bei der Werft zu bauen, bei der sich die Betankung des Schiffes hätte anschliessen können. Damit wäre eine synergetische Nutzung der Tankstellen-Infrastruktur möglich gewesen. Dieser Partner hat das Tankstellenprojekt und das dazugehörige geplante Investment aus finanziellen Gründen zurückgezogen. Dies stellt die Schifffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees (SGV AG) und die Shiptec als Projekt-Ausführende vor grosse Herausforderungen. Neben dem bereits sehr grossen Investment der SGV in das Projekt schiffseitig, muss zusätzliche eine Tankstelleninfrastruktur geplant und finanziert werden. Die Shiptec hat daraufhin begonnen nach alternativen, allenfalls provisorischen Lösungen für die Betankung zu suchen und sich der Planung von Tankstelle und Logistik angenommen. Der Wasserstoff soll nun von einem, bereits in der Schweiz eingesetzten, Speicherranhänger (Trailer) angeliefert werden. Die Betankung erfolgt in einem ersten Schritt durch ein Überströmen des Wasserstoffes ins Schiff und in einem zweiten Schritt wird der verbleibende Wasserstoff mit Kompressoren so weit verdichtet, dass der Trailer vollständig geleert werden kann, bevor er zur Neubefüllung zurück zur Produktionsstätte fährt. Die Tankstelle befindet sich aktuell in der Planungsphase, wobei konkrete Angebote für den Bau dieser Anlage vorliegen, sowie die Baueingabe für die effektive Umsetzung per Ende März 2025 geplant ist.

Der Wasserstoff für den Betrieb wird bei ausreichender Verfügbarkeit, ausschliesslich von einer beim Kraftwerk Bürglen (Uri) geplanten Wasserstoffproduktion bezogen. «Auf dem Areal des KW Bürglen von EWA-energieUri baut die H2Uri AG die erste Wasserstoff-Produktionsanlage in der Zentralschweiz.

Nach der Inbetriebnahme im Jahr 2025 wird die Anlage jährlich bis zu 260 Tonnen grünen (CO₂-freien) Wasserstoff produzieren.»¹¹ Der Betreiber nutzt die Wasserstoff-Produktionsanlage für eine innovative Sektorkopplung. Im sogenannten Hybridwerk wird Strom, Wasserstoff und

¹¹ <https://h2uri.ch/ueber-uns/>

Wärme/Kälte produziert. Dadurch wird ein deutlich höherer Wirkungsgrad erreicht und nicht nur wegen der Produktion von Wasserstoff sehr viel CO₂ eingespart. Konkret wird z.B. die bei der Wasserstoff-Produktion entstehende Wärme/Kälte und auch die Abwärme des Kraftwerks direkt in den Nahwärmeverbund Bürglen eingespiessen und genutzt.¹² Der grün produzierte Wasserstoff (Wasserkraft und Solarstrom) wird mit einem konventionellen LKW, in Trailern zur Weft nach Luzern transportiert.

Kostenbetrachtung

Wie bereits in der *Helios* Studie von 2019 [2] angenommen und im Rahmen dieser Arbeit durch aktuelle Kalkulationen bestätigt, sind die Investitionskosten für den Umbau auf Wasserstoff bedeutend höher, verglichen mit der Diesel-Hybrid Alternative. Vergleiche dazu auch die aktuelle Studie *CO₂-freies Schifffahrt im Berner Oberland*, Kapitel 10 [3]. Zudem ist aktuell Betrieb mit Wasserstoff noch um ca. 60% teurer als mit konzessioniertem Diesel (Kapitel 7.5 [3]). Wie bereits erwähnt, ist neben der reinen Antriebstechnik im Schiff, auch die Konzeption und die Finanzierung einer passenden Betankungsanlage, sowie die dazugehörige Logistik als grosse Herausforderung zu betrachten. Auch bei Berücksichtigung, dass die Wasserstoff-Logistik durch einen Partner abgewickelt wird und in den oben erwähnten 60% Mehrkosten verglichen zu konzessioniertem Diesel integriert ist, müssen Investitionen für eine Wasserstoffbetankungsanlage (inkl. deren Amortisation und Wartung) getätigt werden. Hier konnte im Rahmen dieser Arbeit festgestellt werden, dass dies, je nach Nachhaltigkeitsanspruch (Handling im Betrieb, für mehrere Schiffe oder nur eines, usw.) eine Investition von 0.8 – 1.5 Mio. CHF für die Betankungsanlage erfordert. Diese Kosten müssen innerhalb eines ersten Umsetzungsprojektes getragen werden, können aber bei richtiger Planung für eine weitere Umsetzung einer Wasserstoffstrategie eines Schifffahrtsunternehmen sehr relevant sein. So ist die Tankstelle auch längerfristig, d.h. bei nächsten Um- oder Neubauten verwendbar und kann so vorgesehen werden, dass die relativ einfach erweiterbar ist. Demnach sollte diese Investition nicht nur für ein Schiff, sondern unter dem Gesichtspunkt mehrere zu betreibender Schiffe betrachtet werden.

¹² <https://h2uri.ch/sektorkopplung-hybridwerk/>

4. Umweltbilanz des Umbaus

Im Rahmen dieses Projekts soll neben den technischen Aspekten, auch das effektive CO₂-Einsparungspotential betrachtet werden. Ziel einer damit verbundenen Ökobilanzierungsstudie [1] ist es, die Treibhausgasemissionen der geplanten Antriebsalternative, mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid, mit denen eines Diesel-Hybrid-Antriebs zu vergleichen. Die CO₂-Bilanz wird aus einer Lebenszyklusperspektive erstellt und umfasst den Umbau des bestehenden Passagierschiffes, den Betrieb und nach der Betriebsphase, den Ausbau und die Entsorgung der relevanten Komponenten. Ausgangslage für diesen Vergleich ist, dass die drei Diesel-Generatoren des seriellen Hybridantriebes der MS Saphir nach 12 Jahren Betrieb (2012 - 2024) ihr Lebensende erreicht haben und daher ein Ersatz der Antriebsanlage auf jeden Fall notwendig ist (Dieselgeneratoren eines Binnenschiffes haben eine zu erwartende Lebensdauer von ca. 10 Jahren (Schnellläufer) [12]) Dabei wurde für den Vergleich eine aktuell, realistische Antriebskonfiguration herangezogen, welche moderne Dieselgeneratoren mit Abgasnachbehandlung, Elektromotoren und Batterien zu einem modernen seriellen Hybrid-System kombiniert. Die aktuell gültigen technischen Vorschriften in der Schweiz [13], insbesondere die Anforderungen an die Schadstoffemissionen nach VASm [13], könnten nur so erfüllt werden. Die Studie berechnet aus einer Lebenszyklusperspektive die THG-Emissionen und weist sie als CO₂ Äquivalent aus. Berücksichtigt werden dabei insbesondere die folgenden Bereiche:

- Schiffsumbau inkl. Herstellung, Installation, Ausbau, und Recycling bzw. Entsorgung der relevanten Komponenten
- Kraftstoffherstellung und Logistik
- Direkte Emissionen aus der Dieselverbrennung
- Wartung bzw. Austausch von Komponenten

Die Ergebnisse der Ökobilanz [1] sind vereinfacht in Abbildung 5 dargestellt. Die Antriebsalternative mit Wasserstoff verursacht über die gesamte Lebensdauer 1.26 kg CO₂-eq¹³/Fahrzeugkilometer (Fzkm), während die Antriebsvariante Diesel-Hybrid hingegen 7.69 kg CO₂-eq/Fzkm verursacht. Demnach betragen die CO₂-eq Emissionen pro Fahrzeugkilometer vom Diesel-Hybrid gegenüber dem Wasserstoffantrieb ungefähr das Sechsfache. In der Grafik ist zu sehen, dass der Umbau auf Wasserstoffantrieb höhere Emissionen verursacht als auf Diesel-Hybrid. Dies ist v.a. den hohen CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Einbauen komplexer Energiespeicher (Batterie und Wasserstofftanks) geschuldet. Dies wird jedoch durch die wesentlich geringeren Emissionen im Betrieb mehr als ausgeglichen. Ausschlaggebend für das deutliche Ergebnis sind die höhere Endenergieeffizienz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs und die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff aus Wasserkraft anstelle von fossilem Diesel.

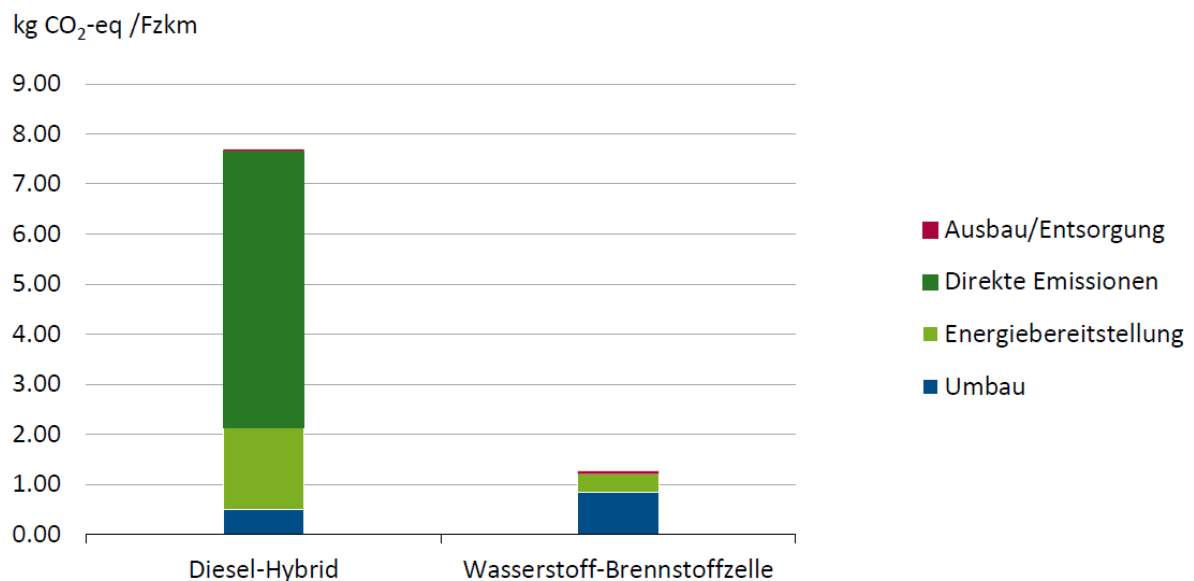


Abbildung 5: Vergleich Treibhausgasemissionen der beiden Antriebsalternativen aus [1]

Eine Sensitivitätsanalyse in der Studie hat ergeben, dass auch bei Verwendung von Biodiesel anstelle von Diesel, die Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebsalternative umweltfreundlicher ist. Falls der verwendete Wasserstoff mit einem CO₂-intensiveren Verfahren (SMR – Steam Methane Reforming) produziert würde, wären die Emissionen zwar höher als bei der erneuerbaren Wasserstofferzeugung, aber niedriger als beim Diesel-Hybrid-Antrieb unter Verwendung von fossilem Diesel. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 6 dargestellt. Weiter zeigt eine Variation des Wasserstoffverbrauchs um ±20 %, dass die Vorteile des Wasserstoffantriebs selbst bei einem um 20% höheren, resultierenden Verbrauch erhalten bleiben. Mit 1.32 kg CO₂/Fzkm sind die Emissionen nur rund 5% höher als bei der Basisvariante mit grünem Wasserstoff, da die Emissionen aus der Energiebereitstellung nur einen Anteil an den Gesamtemission haben.

¹³ CO₂-eq: CO₂-Äquivalente sind eine Maßeinheit. Sie werden CO₂-eq abgekürzt. CO₂-Äquivalente geben die Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase an.

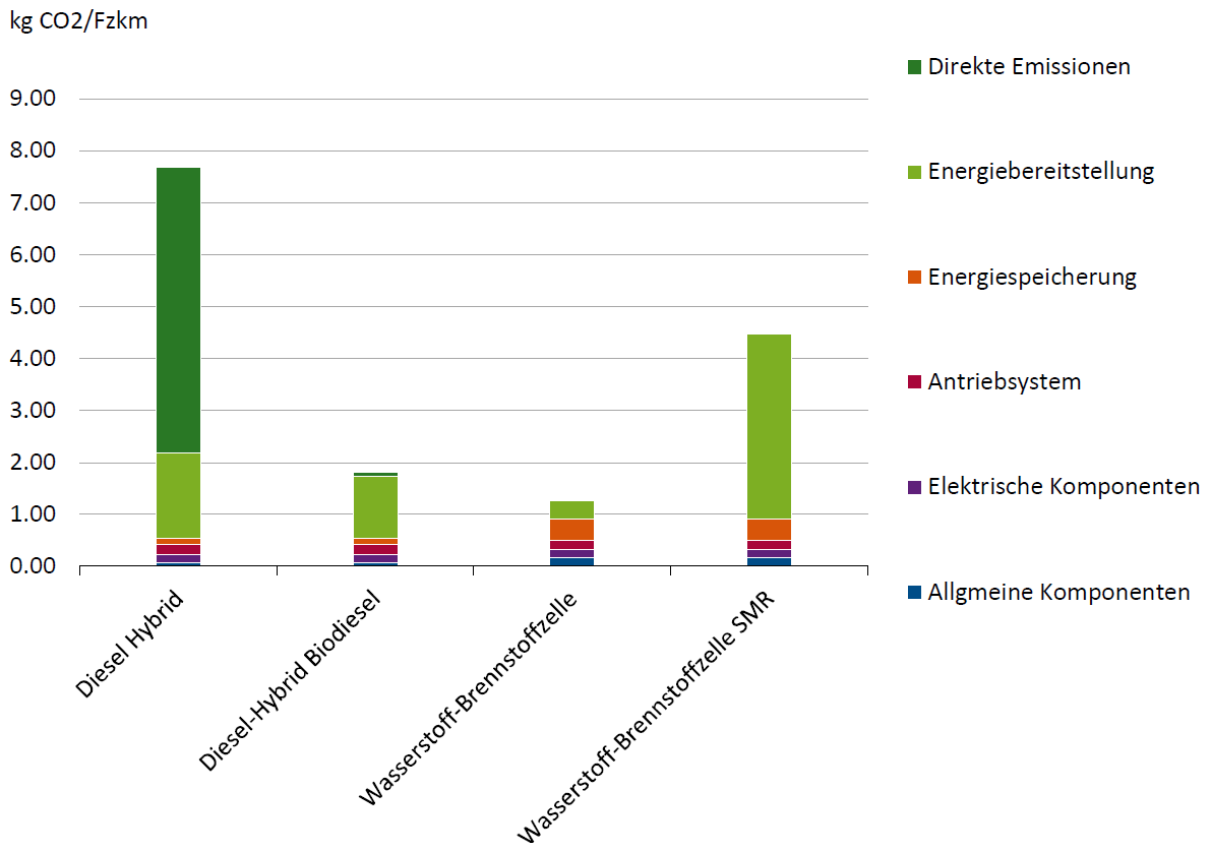


Abbildung 6: Vergleich Einfluss Treibstoffalternativen und Herstellungsverfahren aus [1]

Zusammengefasst bestätigt die Studie [1], dass der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb im Bezug auf den Klimaschutz deutlich vorteilhafter als der Diesel-Hybrid-Antrieb ist. Die Bilanz fällt aufgrund der mehrfach geringeren Emissionen im Betrieb klar zugunsten der Wasserstoff Alternative aus, wobei die leicht höheren Emissionen für den Umbau auf die Wasserstoff Alternative wenig Einfluss auf das Ergebnis haben.

Insgesamt zeigt die Ökobilanz, dass der Umbau eines Passagierschiffs auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb eine signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen ermöglicht und aus klimapolitischer Sicht eine sinnvolle Alternative zum Erreichen einer klimaneutralen Schifffahrt in der Schweiz darstellt.

Weitere Informationen können der Studie [1] direkt entnommen werden.

5. Diskussion

Herausforderungen im RBC-Prozess

Der RBC-Prozess als Zulassungsverfahren stellt besondere Herausforderungen im Zusammenhang mit der Einführung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien dar, ist jedoch aktuell der einzig mögliche und auch praktikable Weg eine Zulassung zu erhalten (gilt nicht nur für die Schweiz, sondern auch im internationalen Kontext). Obwohl der Prozess selbst etabliert ist, stellt die zugrunde liegende Technologie eine neuartige Entwicklung für den maritimen Einsatz dar. Bisher liegen nur begrenzte Erfahrungswerte hinsichtlich ihrer Anwendung in der Schifffahrt vor, und standardisierte Verfahren für die Integration in Schiffe sind noch nicht umfassend definiert. Eine stärkere Standardisierung könnte die Verbreitung der Technologie beschleunigen, insbesondere in der Binnenschifffahrt, die in Bezug auf den Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff ein großes Entwicklungspotenzial bietet. Herausforderungen beim Auslegungsprozess wurden insbesondere bei der Dimensionierung der Ventilation festgestellt, welche von sehr vielen Faktoren von verschiedenen Komponenten abhängt, als auch bei der Spezifikation von Wasserstofftanks und Brennstoffzellen. Dies erfordert eine enge Abstimmung zwischen Herstellern, Zulassungsstellen, Betreiber und weiteren, beteiligten Akteuren.

Systemauslegung

Da die Lebensdauer und die Effizienz der Hauptkomponenten wie Brennstoffzelle und Batterien sehr stark vom entsprechenden Einsatz abhängt, muss ein schonender Betrieb dieser Komponenten bereits bei der Auslegung berücksichtigt werden. So ist es wichtig, dass die eingesetzte Batterie nur so weit belastet wird, wie sie für die geplante Zyklenzahl vorgesehen ist. Des Weiteren sollen sich die Lade- und Entladeleistungen nicht negativ auf die Lebensdauer auswirken. Bei den Brennstoffzellen ist einer möglichst gleichmässigen Auslastung im effizientesten Betriebspunkt Rechnung zu tragen. Entsprechend ist bei der Auslegung die Nennleistung soviel höher zu wählen, dass die Betriebspunkte für alle Einsätze in dem optimalen Bereich zu liegen kommt. Die Steuerung der Brennstoffzelle muss diese Faktoren ebenfalls berücksichtigen.

Begrenzte Verfügbarkeit von Komponenten und Sub-Systemen

Ein wesentliches Problem stellt die begrenzte Anzahl kompetenter Lieferanten und Experten dar. Obwohl viele Anbieter ihre Eignung für die Entwicklung und Bereitstellung von Wasserstoff- und Brennstoffzellensystemen betonen, zeigt sich in der Praxis, dass nur wenige über das notwendige Knowhow und die Erfahrung verfügen oder bereit sind, sich das nötige Knowhow aufzubauen. Dies erschwert die Auswahl geeigneter Partner und erhöht das Risiko von Verzögerungen oder Qualitätsproblemen im Zulassungsprozess. Zudem ist die Verfügbarkeit von Komponenten mit maritimer Zulassung für diese Technologie stark beschränkt. Der Markt bietet bislang nur eine begrenzte Auswahl an zertifizierten Bauteilen, sodass häufig auf alternative Normen und Lösungen zurückgegriffen werden muss, welche aber wieder im Rahmen des

RBC-Prozesses reflektiert werden können. Dies führt momentan noch zu einem erhöhten Entwicklungs- und Prüfaufwand und kann allenfalls die Markteinführung neuer Systeme erheblich verzögern. Bis hier Verbesserung auftritt, ist es jedoch nur eine Frage der Zeit.

Mangel an Standards und Best Practices

Auch fehlt momentan eine klare Tendenz zur Standardisierung und zur breiten Anwendung der Wasserstoff-Technologie im Schiffbau. Dies auch weil der Einsatz, wie er in diesem Projekt angestrebt wird, tendenziell nur in der (im Vergleich zur Seeschifffahrt) kleinen Binnenschifffahrt möglich ist. Derzeit wird jedes Projekt mit unterschiedlichen technischen und konzeptionellen Ansätzen umgesetzt, wodurch es an einheitlichen Prozessen und Best-Practices mangelt. Dies erschwert nicht nur die Vergleichbarkeit und Skalierbarkeit, sondern verdeutlicht auch sehr gut das enorme Entwicklungspotenzial in diesem Bereich. Eine stärkere Standardisierung und Harmonisierung der Anforderungen, was auch Teil dieses Projektes ist, könnte die Verbreitung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien im Schiffbau erheblich beschleunigen. Exemplarisch kann hierfür erwähnt werden, dass die Brennstoffzellenkomponenten für dieses Projekt (und für die Binnenschifffahrt im Besonderen) explizit in einer Grösse und Nennleistung entwickelt wurden, die eine Skalierung, speziell für Binnenschiffe erlaubt.

Umweltbilanzierung

In der vorliegenden Studie wurde die geplante Antriebalternativen mit Wasserstoff mit einer Diesel-Hybrid Antriebsalternative verglichen. Die Ergebnisse zeigen im Bezug auf den Klimaschutz klar den Vorteil des Wasserstoff Hybrid Antriebs auf. Der Unterschied der Bilanz wird von den direkten Emissionen des Diesels dominiert, während die Emissionen durch den Umbau weniger Einfluss auf das Endergebnis haben. Die Sensitivitätsanalyse in der Studie betrachtet sowohl einen deutlich höhere Wasserstoffverbrauch, den Einsatz von Bio-Diesel als auch eine alternative Herstellungsmethode für Wasserstoff. Damit konnte aufgezeigt werden, dass insbesondere der Bezug des Wasserstoffes aus einer nicht grünen Quelle die Bilanz negativ belastet, wobei dies immer noch geringere Emissionen verursacht als der Einsatz von Diesel. Weiter wäre es interessant einen Vergleich zu einer Antriebsalternative mit ausschliesslichem Batteriespeicher (mit eingeschränktem Betrieb) zu erstellen. Die berechneten Ergebnisse der Studie beschränken sich auf das vorliegende Projekt, wohingegen eine allgemeinere Betrachtung für mehrere Schiffstypen und Einsätze für weitere Projekte hilfreich sein könnte.

Finanzierung und Betriebskosten

Wie im Bericht erörtert, ist der Betrieb mit Wasserstoff aktuell noch um ca. 60% teurer als mit konzessioniertem Diesel. Aus diesem Grund ist daher die Frage, wie sich der Wasserstoffpreis in Zukunft entwickelt, eine der wichtigsten Faktoren um eine zukünftige (ökonomische) Vergleichbarkeit mit Diesel als Treibstoff zu erlangen. Die Treibstoffzollbefreiung bei Diesel für eidgenössisch konzessionierte Schiffsbetriebe sind für viele Schifffahrtsgesellschaften ein wichtiges Mittel, um die öffentlichen Schiffskurse kostendeckend betreiben zu können. Diese z.T. vorhandene Subventionierung fossiler Treibstoffe verhindert jedoch die Wahlmöglichkeit und damit das Etablieren einer alternativen Antriebstechnologie.

Des Weiteren sind die Pläne, bzgl. Ausbau des Wasserstoffversorgungsnetzes für den Strassenverkehr und/oder die Industrie, welche in den Jahren 2020-2022 verfolgt wurden, wegen der erhöhten Strompreise und aufgrund diverser globaler Krisen, ins Stocken geraten. Dies hat im Kontext eines Betriebs von Schiffen mit Wasserstoff ein grosses, mögliches Synergie- und somit Kosteneinsparungspotenzial in den Hintergrund gerückt. Somit liegen der Bau der Tankstelle und die Finanzierung der Wasserstofflogistik ganz beim Betreiber. Dies ist im Falle von der MS Saphir zwar dank der Investitionsbereitschaft der SGV AG und den vorhandenen Förderprogrammen des Bundes möglich, jedoch stellt dies eine grosse Herausforderung in der Schweizer Binnenschifffahrt dar. Die meisten Schifffahrtsgesellschaften sind heute nicht in der Lage solche Investitionen, insbesondere in die dazu notwendige Infrastruktur vollständig selbst zu tragen. Um dies zu vermeiden, sollten in Zukunft Synergien mit anderen Verkehrsträgern oder der Industrie gesucht werden.

Vergleich mit dem Projekt Helios

Das Projekt Helios [2] wurde 2019 von der Shiptec AG in Zusammenarbeit mit INERSO GmbH umgesetzt, um den möglichen Einsatz von Wasserstoff in der Schweizer Binnenschifffahrt zu analysieren. Unterstützt durch das Bundesamt für Energie (BFE) und weitere, wurde untersucht, ob ein mittelgrosses Fahrgastschiff ökonomisch und ökologisch sinnvoll mit Wasserstoff betrieben werden kann.

Dabei wurde die generelle technische Machbarkeit eines Umbaus von der MS Saphir auf einen Wasserstoff-Antrieb bereits bestätigt. Im Rahmen dessen wurde auch die geeignetste Speicherform von Wasserstoff als Energieträger gesucht. Die *Helios* Studie [2] hat damit im Vorfeld wichtige technische Aspekte geklärt, auf welchen die aktuelle Auslegung aufbauen konnte. So wurde die empfohlene Speicherform, gasförmig in Flaschen bei 350 bar, übernommen und auch die empfohlene Wasserstoff Batterie Hybridlösung wurde berücksichtigt. Weitere technische wie auch ökonomische Ergebnisse der Studie konnten als Grundlage für das vorliegende Projekt *Zero Emission Saphir* verwendet werden, wobei nicht die Umsetzungsart als solches, vor allem aber die Berücksichtigung neuester technischer Trends und ökonomischer Randbedingungen neu betrachtet werden mussten. Alles in allem kann aber gesagt werden, dass die Studie *Helios* eine fundierte Grundlage zu den nun hier durchgeführten Arbeiten geliefert hat.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse des Zulassungsprozesses

Einer der wichtigsten, erreichten Meilensteine ist der Erhalt des *Approval in Principle* (AiP) von Lloyds Register, welches den Abschluss des Initial Designs für Schiff und System darstellt und eine vollständige Dokumentation des Konzeptes, sowie dessen sicherheitstechnische Freigabe beinhaltet. Die Voraussetzungen für die Zielerreichung, waren sowohl das Aufsetzen, der Start und das Durchführen der zweiten Stufe des risikobasierten Zulassungsprozesses (RBC2) mit Lloyds Register und dem BAV, als auch die komplette Auslegung der Hauptkomponenten, Systeme und der dazugehörigen Sicherheitsmassnahmen. Mit dem AiP konnte bereits aufgezeigt werden, dass der verfolgte Ansatz von einer Klasse als ausreichend sicher und zuverlässig bewertet wird. Das von Lloyds Register geführte Verfahren konnte mit dem BAV als zulassende Schweizer Behörde erfolgreich etabliert werden und die Zuständigkeiten bzgl. der Verantwortlichkeiten bei der effektiven Zulassung des Schiffes konnten definiert werden. Präskriptive Regeln für die Anwendung von Wasserstoff auf Schiffen können in Zukunft die Zulassung vereinfachen, wobei damit zu rechnen ist, dass der risikobasierte Zulassungsprozess für die Anwendung von Wasserstoff oder andere Alternativen, auf unbestimmte Zeit der einzige mögliche Zulassungsprozess sein wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der risikobasierte Zulassungsprozess eine längere Planungszeit erfordert und mit höheren Kosten verbunden ist.

Ökobilanz und technische Machbarkeit

Die Ökobilanzierung-Studie zeigt klar auf, dass die Treibhausgasemissionen gegenüber einer Diesel-Hybrid-Antriebsalternative um ein Vielfaches geringer sind; auch im Vergleich zur Verwendung von Biodiesel. Ausserdem konnte aufgezeigt werden, dass für die benötigte Energiemenge mit einem reinen Batteriespeicher das Systemgewicht zu hoch wäre, um das Schiff betreiben zu können. Mit dem Vergleich Wasserstoff- gegenüber Batteriespeicher konnte aufgezeigt werden, dass ab einer benötigten Energiemenge von ca. 1250 kWh die Wasserstofflösung in Bezug auf das Gewicht die bessere Lösung ist. Bereits schon bei Netto-Energiemengen über 640 kWh zeigt sich zudem, dass ein Ausbau auf eine reine Batterielösung wegen der anschliessend fehlenden Flexibilität im Betrieb eine Herausforderung darstellen könnte. Die spezifischen Anforderungen und Eigenheiten in der Binnenschifffahrt wurden für die Systemauslegung, Komponentenauswahl oder Komponentenentwicklung (Bsp. Brennstoffzelle) berücksichtigt. Die vorliegende Auslegung kann als Grundlage für den Um- oder Neubau von anderen Binnenschiffen und damit als Orientierung bei möglichen Optionen für Antriebsalternativen herangezogen werden. Zukünftige Um- oder Neubauprojekte in der Binnenschifffahrt sollten die Ergebnisse dieser Arbeit berücksichtigen, um Entwicklungskosten einzusparen.

Empfehlungen zur Betankungsinfrastruktur

Wird der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger auf anderen Binnengewässern in Betracht gezogen, wird empfohlen frühzeitig eine Betankungslösung zu suchen. Dabei ist es sinnvoll zu prüfen, ob die Mitnutzung einer Anlage für den Strassenverkehr oder der Industrie möglich ist. Hierzu könnten aktuelle Wasserstofftankstellenbetreiber auf die zukünftige Nutzung von Wasserstoff durch die Binnensee Schifffahrt aufmerksam gemacht werden, um damit wassernahe Standorte und somit grössere Abnahmemengen zu generieren, was den Betrieb von Tankstellen in jedem Fall attraktiver macht.

Empfehlung für die zukünftige Finanzierbarkeit solcher Projekte

Da die Finanzierung eines solchen Vorhabens grundsätzlich schwierig ist und im Besonderen für die Schifffahrtsgesellschaften in der Schweiz ein zukünftiger CO₂-Neutraler Betrieb (unabhängig ob mit Wasserstoff oder anderen Technologien) eine grosse Herausforderung darstellt, ist es aus Sicht der Autoren notwendig, neben den bestehenden Fördermöglichkeiten durch den Bund, weitere evtl. finanzpolitische Massnahmen umzusetzen. Nach Meinung der Autoren ist das hier vorliegende Konzept und die damit verbundenen Teilschritte, insbesondere für Schiffe mit langen Betriebszeiten und im öffentlichen Verkehr, ein richtiger und zwingend nötiger Schritt, um die Schweizer Schifffahrt CO₂-Neutral zu machen.

Empfehlungen zur Umsetzung

Bei Betrachtung all dieser Aspekte, wie auch der bis anhin erarbeiteten technischen Erkenntnissen empfehlen die Autoren und der Eigner SGV AG, das erfolgreich durchgeführte Vorprojekt in die Umsetzung zu überführen und damit sowohl die Zulassung abzuschliessen als auch die tatsächliche technische Realisierung auszuführen und im Betrieb zu erproben. Eine Voraussetzung dafür ist die finanzielle Förderung des Bundes. Mit der Weiterführung des Projektes kann die Umsetzbarkeit einer neuartigen, ökologischen Antriebsalternative nachhaltig aufgezeigt und validiert werden. Insbesondere für die Personenschifffahrt auf Schweizer Seen mit grösseren Schiffen und den typischen Längskursen (z.B. Luzern-Flüelen-Luzern oder auch z.B. Thun-Interlaken-Thun) kann so ein Lösungsweg aufgezeigt werden, um auch diesen Einsatz CO₂-neutral zu gestalten. Insbesondere im Einsatz auf Kursen mit einem Energiebedarf von 3-12 MWh pro Tag, ist ein Betrieb mit reinen Batteriespeichern, respektive der dafür nötigen Ladeninfrastruktur, technisch wie auch kommerziell nicht ohne weiteres möglich. Hier bietet das hier erarbeitete und zur Umsetzungsreife gebrachte Konzept die Möglichkeit einen Proof-of-Concept zu realisieren, welches einen CO₂-neutralen Schiffsbetrieb auch auf langen Strecken ermöglicht. Mit der Umsetzung und einem funktionierenden Betrieb können derzeit bestehende Zweifel an der Praxistauglichkeit ausgeräumt und dem Markt eine Alternative geboten werden.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

AB-SBV	Ausführungsbestimmungen der Schiffbauverordnung
AC	Alternating current
AiP	Approval in Principle
ALARP	As low as reasonable possible
BAV	Bundesamt für Verkehr
BFE	Bundesamt für Energie
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPU	Central processing unit
DC	Direct current
DC-BUS	DC highvoltage grid
DOD	Depth of Discharge
eMS	elektrisches Motorschiff
EPMS	Electrical Power Management System
ESTI	Eidgenössisches Starkstrominspektorat
ESöV	Energiestrategie im öffentlichen Verkehr
FC	Fuel cell
Fzkm	Fahrzeugkilometer
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard Operations
IACS	International Association of Classification Societies
ICF	International Code of Safety
IEC	International Electrotechnical Commission
IGF Code	International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flash-point Fuels
IMO	International Maritime Organization

LCA	Life Cycle Analysis
LR	Lloyds Register
MS	Motorschiff
OFT	Office Fédéral des Transports
PAR	Preliminary Appraisal of Rules
RBC	Risk Based Certification
SBV	Schiffbau Verordnung
SETP	Stratégie énergétique dans les transports publics
SGV	Schiffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee
SMR	Steam Methane Reforming
SOC	State of charge
TCO	Total cost of ownership
TPRD	Thermal Pressure Relief Device
VAC	Volt AC
VASm	Verordnung über die Anforderungen an Schiffsmotoren auf schweizerischen Gewässern
VDC	Volt DC

Literaturverzeichnis

- [1] D. B. C. D. A. G. I. Dr. Ursina Walther, «Ökobilanz des Umbaus eines Passagierschiffs auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb Ergebnisbericht,» INFRAS Forschung und Beratung, Zürich, 2025.
- [2] L. Schreuder, F. Holdener und D. Suter, «Projekt HELIOS: Modellstudie für H2-Binnenschifffahrt,» Bundesamt für Energie BFE, Luzern, 2019.
- [3] M. Fracasso und J. Rosenberg, «CO2-freie Schifffahrt im Berner Oberland,» Shiptec AG und H2 Energy AG, Luzern, 2023.
- [4] BAV, «Projekte ESöV 2050: Kurzbeschrieb (D), Résumé (F), Summary (E): P-260 «Zero-Emission-Saphir» Umbau und Versuchsbetrieb mit wasserstoffbasierter Antriebstechnologie,» BAV, Bern, 2024.
- [5] LR, «Ship Right - Design and Construction - Risk management - Risk Based Certification (RBC),» Lloyd's Register Group Limited, London, 2021.
- [6] IMO, «MSC.1/Circ.1455: Guidelines for the Approval of Alternatives and Equivalents as Provided for in Various IMO Instruments,» International Maritime Organization, London, 2013.
- [7] IMO, «MSC.1/Circ.1002: Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety,» International Maritime Organization, London, 2001.
- [8] IMO, «MSC.1/Circular.1212/Rev.1: Revised Guidelines on Alternative Design and Arrangements for SOLAS Chapters II-1 and III,» International Maritime Organization, London, 2019.
- [9] IMO, «International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code),» Maritime Safety Committee, Resolution MSC.391(95), 2015.
- [10] UVEK, «Verordnung über Bau und Betrieb von Schiffen und Anlagen öffentlicher Schifffahrtsunternehmen (Schiffbauverordnung, SBV) 1994,» Der Schweizerische Bundesrat, Bern, 2021.
- [11] UVEK, «Ausführungsbestimmungen des UVEK zur Schiffbauverordnung (AB-SBV),» Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern, 2024.
- [12] K. MOIRANGTHEM, «Alternative Fuels for Marine and Inland Waterways,» European Union, doi: 10.2790/227559 (online), 2016.

[13] UVEK, «Ausführungsbestimmungen des UVEK zur Verordnung über die Anforderungen an Schiffsmotoren auf schweizerischen Gewässern (AB-VASm),» Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bern, 2017.

Anhang

A	Approval in Principal, ausgestellt von Lloyd's Register	44
B	General Arrangement Public Version	47
C	Single Line Diagramm	48
D	Ökobilanz des Umbaus eines Passagierschiffs auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb [1]	49

Shiptec AG
Werftstrasse 5
CH-6002 Luzern
Switzerland

Lloyd's Register EMEA
Global Technical Support Office
George Hintzeweg 77
3068 AX Rotterdam
The Netherlands
T +31 102500335

E mark.nijhoff@lr.org
<http://www.lr.org>

Your ref -
Our ref RTS-ENS-ETS-F&S-241365-MJN

Attn Mr. Martin Einsiedler

11 June 2024

APPROVAL IN PRINCIPLE (AIP)
BELOW DECK, GASEOUS HYDROGEN STORAGE AND FUEL CELL SYSTEM RETRO FITTED ON
PASSENGER VESSEL MS "SAPHIR"
BY
SHIPTEC AG

1. Lloyd's Register EMEA, has undertaken a Novel Technology Evaluation of SHIPTEC AG proposal for the application of a Gaseous Hydrogen Storage and Fuel Cell system with underdeck storage of Type IV gas cylinders fitted with the on-tank valves including a TPRD with a view to awarding an "Approval in Principle". The safety concept of the Underdeck Storage and Fuel Cell system is by emergency shutdown on gas detection (known as ESD-concept) of the Hydrogen Storage and Fuel Cell system. The system will be fitted on board of the ship intended as range extender, where the ship can safely sail and manoeuvre on redundant battery power. The Storage and Fuel Cell system is fitted in a dedicated space with a redundant ventilation system, gas detection and a TPRD per gas cylinder
2. The Evaluation included an overall examination of fundamental aspects of the design and general compliance with the following Rules and Regulations:
 - **LR Rules and Regulations for the Classification of Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels Part-A, and Appendix LR3, July 2023**
 - **IGF Code – International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels Part A**
 - **Other applicable Rules and Regulations for reference:**
 - **LR Rules and Regulations for the Construction and Classification of Ships, July 2023**
 - **LR Rules and Regulations for the Construction and Classification of Inland Waterway Ships, July 2023**
 - **Ausführungsbestimmungen des UVEK zur Schiffbauverordnung**
 - **Vorordnung über Bau und Betrieb vom Schiffen und Anlagen öffentlicher Schifffahrtsunternehmen**
3. The documentation on which the AiP is based:

	Document	No.	Revision
a)	H2 Shiptec basic storage schematic	157_04768_67	B
b)	H2 Shiptec Safety description of a typical gaseous hydrogen/fuel cell system on a vessel	157_04773_11	C
c)	HAZID report and recommendation action register	2309-0048R01	0

d)	General arrangement Hydrogen MS Saphir	365_04759_11	A
e)	Hazard Zone, Piping & Ventilation Plan	365_04771_11	A
f)	MS Saphir Design & Safety Statement	365_04812_15	A
g)	GAP Analysis Report MS PAPHIR & MS QUINTEN LEBT	21 February 2024	1.0
i)	PAR, Preliminary Appraisal of Rules	January 2024	-

4. A risk assessment has been conducted to ensure that risks arising from the use of gaseous Hydrogen Storage and Fuel Cell system fitted below deck, which may affect persons onboard, the structural strength and the integrity of the ship in accordance with LR's **ShipRight Procedure for Risk Based Certification (RBC)** as follows for this **AiP**;
 - Hazard Identification study "Hydrogen-based Propulsion HAZID Report" (Ref. no. 2309-0048R01 version 0)
5. Lloyd's Register EMEA considers that the design philosophy has the potential to achieve compliance through providing an equivalent level of safety in design and it is Approved in Principle subject to final close out of the actions detailed in **paragraph 4.4** of the Hazard Identification study "**RBC-2 Hydrogen-based Propulsion HAZID Report, Document No. 2309-0048R01 Report version 0**", the consideration of the items raised in the **Preliminary Appraisal of Rules (PAR)** and the review findings of the submitted technical documentations appraised under the Design Appraisal Document RTS-ENS-241349A issue 0 dated 31 may 2024.
6. The '**Approval in Principle**' (**AiP**) does not constitute regulatory approval, which needs to be sought from the vessel's proposed flag administration.
7. Detailed assessment of the design, and its specific shipboard application would be subject to the normal classification approval including further risk assessment studies according to LR's RBC-3, 4 and 5 processes.

Mark Nijhoff

Lead Specialist Piping & Decarbonization
Systems
Global Technical Support Office Rotterdam
Netherlands
+31 102500335



Carlo Russo

Fire & Safety Team Leader
Small Ships & In-service
Global Technical Support Office Trieste Italy
+39 040 9790019

Jacob Munk Plum

Lead Surveyor – Electrical and Control
Global Technical Support Office Copenhagen
+45 35153684

Lloyd's Register and variants of it are trading names of Lloyd's Register Group Limited, its subsidiaries and affiliates. Lloyd's Register EMEA (Reg. no. 29592 R) is a registered society under the Co-operative and Community Benefit Societies Act 2014 in England and Wales. Registered office: 71 Fenchurch Street, London, EC3M 4BS, UK. A member of the Lloyd's Register group.

Lloyd's Register Group Limited, its affiliates and subsidiaries and their respective officers, employees or agents are, individually and collectively, referred to in this clause as 'Lloyd's Register'. Lloyd's Register assumes no responsibility and shall not be liable to any person for any loss, damage or expense caused by reliance on the information or advice in this document or howsoever provided, unless that person has signed a contract with the relevant Lloyd's Register entity for the provision of this information or advice and in that case any responsibility or liability is exclusively on the terms and conditions set out in that contract.



Lloyd's Register Asia (Reg. no. 29593 R) is an Industrial and Provident Society registered in England and Wales. Registered office: 71 Fenchurch Street, London, EC3M 4BS, UK. A member of the Lloyd's Register group.

[illegible]

A detailed plan view of a ship's hull, oriented horizontally with the bow at the right end. The hull number '120' is visible near the stern. The interior features several curved seating or deck areas, some labeled '120 PAX'. Structural elements include two sets of stairs (one labeled 'DOWN'), multiple doors, and various bulkheads. A scale bar along the bottom edge ranges from 0 to 100 units.

A detailed floor plan of the boat's main deck, oriented from the stern (left) to the bow (right). The plan includes the following areas and features:

- MAIN DECK:** The overall deck area.
- GALLERY:** A narrow walkway along the upper edge of the deck.
- FRIDGE:** Located near the entrance to the cabin.
- Entrance:** The main access point to the cabin.
- Wheelhouse:** The command center of the boat, located towards the bow.
- BOARDING DECK:** The deck area used for passengers to board the boat.
- FOREDECK:** The deck area at the very front of the boat.
- INTERNAL ROOMS:**
 - Salon:** A large open area with many chairs arranged in rows.
 - Office:** A small room with a desk and chair.
 - Toilet:** A small room with a toilet.
 - Universal Toilet:** A larger toilet facility.
 - Storage:** Various storage areas throughout the deck.

MAIN DIMENSIONS		
FW	149.0	in
Wt		
SW	8.30	in
Mounted Strength		
Depth		
3-wire WAV loadcase	1.0	in
3-wire no strength		
3-wire case: WAV loadcase	160	+
Full coil module	3645	W
Maximum amp capacity	180	+
Setting a capacity		
Min. type (electrical)	24.180	W
Resistance	320	
Flow		
3-wire		Sholes AS
Unit AW-SRV	8	
Tag coil	6070	
Tag: 3-wire conversion	12070	

[illegible]

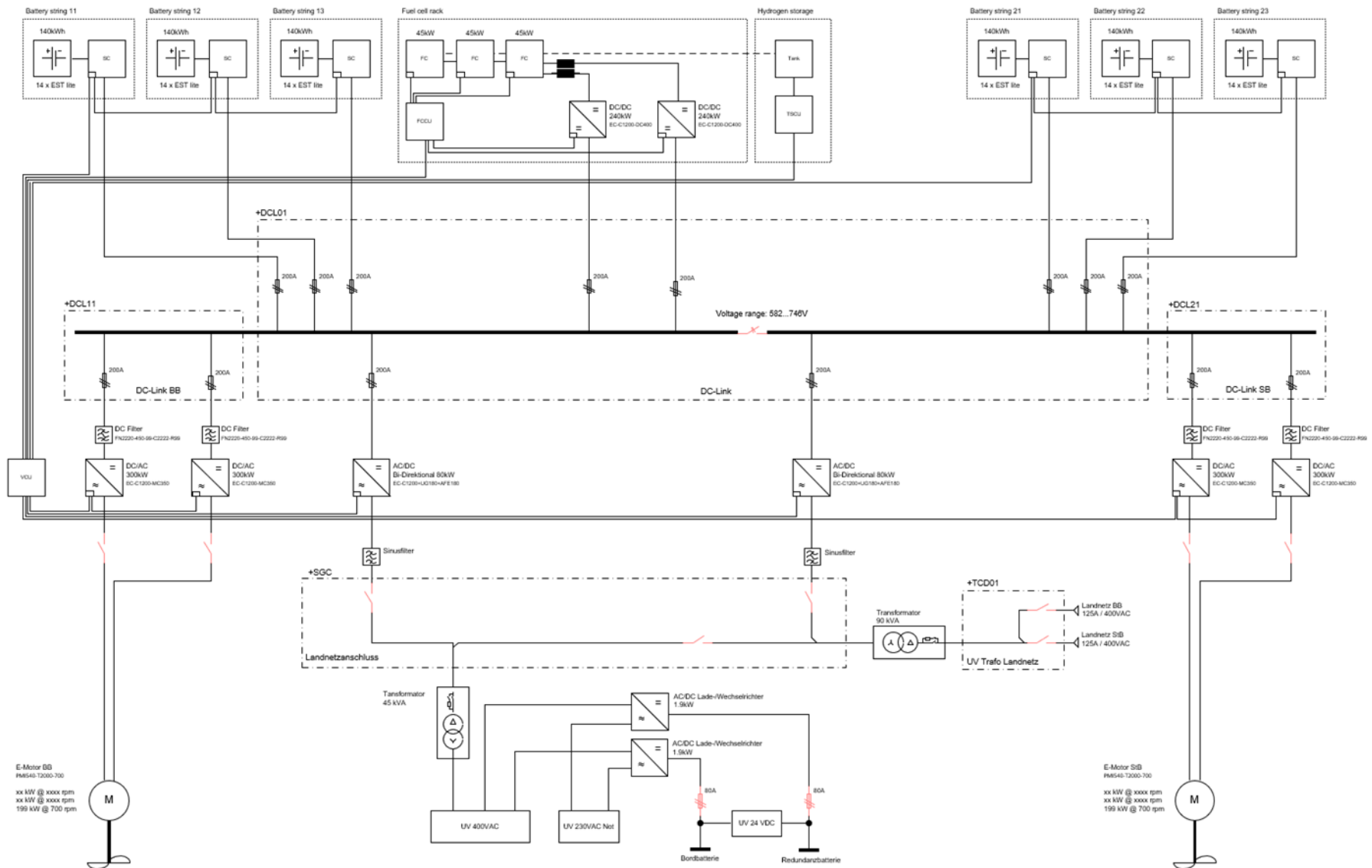


Abbildung 7: Single Line Diagramm