



Schlussbericht

Projekt HELIOS

Modellstudie für H2-Binnenschifffahrt



©SGV 2015



Datum: 31. Oktober 2019

Ort: Luzern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Schiffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee
CH-6002 Luzern
www.lakelucerne.ch

Centralschweizerische Kraftwerke AG
CH-6015 Luzern
www.ckw.ch

Auftragnehmer/in:

Shiptec AG
CH-6002 Luzern
www.shiptec.ch

INERSO GmbH
CH-5400 Baden
www.inerso.ch

Autor/in:

Lukas Schreuder, Shiptec AG, l.schreuder@shiptec.ch
Fridolin Holdener, INERSO GmbH, f.holdener@inerso.ch
Daniel Suter, INERSO GmbH, d.suter@inerso.ch

BFE-Programmleitung: Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501761-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt Helios wurde auf Initiative von Shiptec AG in Zusammenarbeit mit der Firma INERSO GmbH lanciert, um den Einsatz von Wasserstoff in der Schweizer Binnenschifffahrt zu analysieren. Mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie (BFE), der Schifffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee (SGV) und der Centralschweizerischen Kraftwerke AG gilt es die Frage zu klären, ob ein Fahrgastschiff mittlerer Grösse ökonomisch und ökologisch sinnvoll betrieben werden kann.

In der Folge wurde während dem Projekt anhand eines bestehenden Personenschiffs der SGV, dem MS Saphir, ein hypothetischer Umbau von einem Dieselantrieb auf einen Wasserstoffantrieb durchgeführt. Neben den schiffbaulichen Aspekten eines solchen Umbaus inklusive der zu verwendenden Regularien, wurde auch die Herstellung und Verfügbarkeit von Wasserstoff sowie die geeignetste Speicherform untersucht.

Technisch ist es durchaus möglich ein bestehendes Passagierschiff auf einem Schweizer Binnensee auf einen Wasserstoffantrieb umzurüsten. Es müssen allerdings durch den Platzbedarf von neuen Systemen gewisse Kompromisse in der Nutzung der Räume eingegangen werden, was sich bei einem Neubau einfacher gestaltet. Je nach Einsatzprofil eines Binnenschiffs, so hat es sich im Laufe des Projekts gezeigt, ist ein Wasserstoff-Batterie-Hybridssystem sinnvoller. Haupttreiber für diese Entscheidung sind neben dem verfügbaren Platz und Gewicht die tägliche Anlegezeit und die maximal übertragbare Energie vom Landstromnetz. Auch die Verfügbarkeit von nachhaltig produziertem Wasserstoff in verschiedenen Formen, vor allem aber als auf 350 bar komprimiertes Gas, wie er in diesem Projekt ausgewählt wurde, ist in der Schweiz gegeben.

Zurzeit ist der Betrieb eines Wasserstoffantriebs kommerziell noch nicht konkurrenzfähig mit mineralölsteuerbefreitem Dieselmotorkraftstoff. Mit Blick auf die Entwicklung des Einsatzes von Wasserstoff im Strassenverkehr und den Produktionsanlagen die sich im Bau bzw. frisch im Betrieb befinden, ist in den nächsten Jahren mit einer kontinuierlichen Preisreduktion beim Wasserstoff zu rechnen. Neben den Betriebskosten sind mit Kosten für einen Neu- oder Umbau des Schiffs und Erstinvestitionen in Tankstelleninfrastruktur von total CHF 3.6 bis 4.4 Mio. zu rechnen.

Dem gegenüber steht ein absolut schadstofffreier Betrieb eines Personenschiffs auf einem Schweizer Binnensee. Neben der Schadstoffreduktion ist auch die Lärm- und Vibrationsbelastung an Bord und für Anwohner von Schiffslandestellen geringer. Dies alles geht mit einem grossen Imagegewinn für die betreibende Schifffahrtsgesellschaft einher.



Résumée

Le projet Helios a été lancé à l'initiative de Shiptec AG en collaboration avec INERSO GmbH pour analyser l'utilisation de l'hydrogène dans la navigation intérieure en Suisse. Avec le soutien de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), de la compagnie maritime Lake Lucerne (SGV) et Centralschweizerische Kraftwerke AG, il reste à clarifier la question de savoir si un navire à passagers de taille moyenne peut être exploité de manière économique et écologique.

En conséquence, une hypothétique conversion d'un moteur diesel en un système de propulsion à l'hydrogène a été réalisée pendant le projet sur la base d'un navire à passagers existant du SGV, le MS Saphir. Outre les aspects de cette transformation liés à la construction navale, y compris la réglementation à appliquer, la production et la disponibilité d'hydrogène ainsi que la forme de stockage la plus appropriée ont été examinées.

Techniquement, il est tout à fait possible de convertir un navire à passagers existant sur un lac intérieur suisse en un système de propulsion à l'hydrogène. Toutefois, en raison des exigences d'espace des nouveaux systèmes, certains compromis doivent être faits dans l'utilisation des salles, ce qui est plus simple dans un nouveau bâtiment. Comme le projet l'a montré, un système hybride à batterie à hydrogène a plus de sens, tout dépendant du profil opérationnel du bateau. Outre l'espace et le poids disponibles, les principaux facteurs qui ont motivé cette décision sont le temps d'accostage quotidien et le maximum d'énergie transférable provenant du réseau électrique à quai. La disponibilité d'hydrogène produit de manière durable sous différentes formes, mais surtout sous la forme de 350 bars de gaz comprimé, choisie dans le cadre de ce projet, est disponible en Suisse.

À l'heure actuelle, l'exploitation d'un système de propulsion à l'hydrogène n'est pas encore compétitive sur le plan commercial avec le carburant diesel exempté de la taxe sur les huiles minérales. En ce qui concerne le développement de l'hydrogène dans le trafic routier et les installations de production en construction ou récemment mises en service, une réduction continue du prix par kilogramme d'hydrogène est attendue au cours des prochaines années. Outre les coûts d'exploitation, il faut s'attendre à des coûts de nouvelle construction ou de reconstruction du navire et à des investissements initiaux dans l'infrastructure des stations-service d'un montant total de 3,6 à 4,4 millions de CHF.

En face se trouve un navire à passagers entièrement dépourvu de polluants sur un lac intérieur suisse. En plus de réduire les polluants, la charge sonore et vibratoire à bord et pour les résidents des points d'atterrissage des navires est moindre. Tout cela va de pair avec un gain d'image important pour la société de transport maritime exploitante.



Summary

The Helios project was launched on the initiative of Shiptec AG in collaboration with INERSO GmbH to analyse the use of hydrogen in Swiss inland shipping. With the support of the Federal Office for Energy (SFOE), the shipping company Lake Lucerne (SGV) and Centralschweizerische Kraftwerke AG, the question to be clarified is whether a passenger ship of medium size can be operated economically and ecologically.

As a result, a hypothetical conversion from a diesel engine to a hydrogen propulsion system was carried out during the project based on an existing passenger ship of the SGV, the MS Saphir. In addition to the shipbuilding aspects of such a conversion, including the regulations to be used, the production and availability of hydrogen as well as the most suitable form of hydrogen storage were examined.

Technically, it is quite possible to convert an existing passenger ship on a Swiss inland lake to a hydrogen propulsion system. However, due to the space requirements of new systems, certain compromises have to be made in the use of the rooms, which is simpler in a new ship. Depending on the operational profile of an inland vessel, as the project has shown, a hydrogen-battery hybrid system makes more sense. The main drivers for this decision are, in addition to the available space and weight, the daily docking time and the maximum transferable energy from the shore power grid. Sustainably produced hydrogen in various forms, but above all as 350 bar of compressed gas, as selected in this project, is available in Switzerland.

At present, the operation of a hydrogen propulsion system is not yet commercially competitive with mineral oil-tax-exempt diesel fuel. With regard to the development of hydrogen infrastructure for road traffic and the production facilities that are under construction or freshly in operation, a continuous reduction in the price of hydrogen is expected over the next few years. In addition to the operating costs, costs for a new or rebuild of the ship and initial investments in filling station infrastructure totalling CHF 3.6 to 4.4 million are to be expected.

The benefit is a completely pollutant-free operation of a passenger ship on a Swiss inland lake. In addition to reducing pollutants, the noise and vibration load on board and for residents of ship landing points is lower. All this goes hand in hand with a big image gain for the operating shipping company.



[leere Seite, damit Inhaltsverzeichnis auf ungerader Seite]



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
2 Ausgangslage	11
2.1 Lösungsansatz	11
3 Grundlagen.....	13
3.1 Modellschiff MS Saphir	13
3.1.1 Einsatzprofil MS Saphir	14
3.2 Vergleich Diesel – Wasserstoff.....	15
4 Wasserstoffproduktion	17
4.1 Quellen für Wasserstoffproduktion	17
4.2 Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse	18
4.3 Stromerzeugung mit Brennstoffzellen	18
5 Speicherung von Wasserstoff.....	20
5.1 Technologien	20
5.1.1 Kryogene Energiespeicherung	20
5.1.2 Feststoffbasierte Energiespeicherung	21
5.1.3 Gasförmige Energiespeicherung	21
5.1.4 Batterie als Energiespeicher.....	22
5.1.5 Zusammenfassung der Energiespeicher.....	22
5.1.6 Bewertungskriterien zur Auswahl der Energiespeicher	23
5.2 Gegebenheiten auf dem Modellschiff MS Saphir	23
5.3 Auswahl Speichertechnologie	24
5.3.1 Wasserstoffhybridsystem	25
5.3.2 Entscheidungstreiber für Wasserstoffhybrid-Lösung.....	26
5.3.3 Kostenvergleich der Speicher- und Trägermedien.....	26
6 Bedingungen auf dem Schiff (Modellschiff)	28
6.1 Regulatorische Voraussetzungen	28
6.2 Räumliche Voraussetzungen.....	29
6.2.1 Gaskonzept.....	29
6.2.2 Lüftungskonzept	30
6.2.3 Brandschutzkonzept	30



6.2.4	Ex-Zonenplan	31
6.2.5	Betankungskonzept	31
6.2.6	Gewichtsbetrachtung	32
6.2.7	Stabilitätsbetrachtung	32
7	Diskussion der Ergebnisse	33
7.1	Investitionskosten	33
7.2	Betriebskosten	33
7.3	Kritische Würdigung zur Gesamtenergieeffizienz	34
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	35
8.1	Nächste Schritte nach Projektabschluss	35
9	Referenzen	36
10	Anhänge	38
10.1	Anhang 1: Wasserstoff	38
10.2	Anhang 2: Schiffsprojekte mit erneuerbaren Antriebsstoffen	40
10.3	Anhang 3: Kenndaten MS Saphir – Effizienzpfade	42
10.4	Anhang 4: Gaskonzept	43
10.5	Anhang 5: Lüftungskonzept	44
10.6	Anhang 6: Brandschutzkonzept	45
10.7	Anhang 7: Ex-Zonenplan	46
10.8	Anhang 8: Stabilitätsabschätzung	47



Abkürzungsverzeichnis

GL	Schiffsklassifikationsgesellschaft, Germanischer Lloyd
DNVGL	Schiffsklassifikationsgesellschaft, Det Norske Veritas Germanischer Lloyd
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
SGV	Schiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees
PEM	Proton Exchange Membrane



1 Einleitung

Das Projekt «Helios» beschreibt das Konzept, die Entwicklung und den Bau eines Binnensee-Fahrgastschiffes, das regional erzeugten, erneuerbaren Strom mittels innovativer Sektorkopplungs-Technologie von Wasserstoff-als-Energieträger und einem neuartigen Energie- und Antriebskonzept mit Brennstoffzellen, Batteriepufferung und elektrischem Motor für den CO₂-neutralen Schiffsantrieb nutzbar macht.

Das «Helios»-Projekt zielt auch daraufhin, Emissionsminderungen und Energieeinsparungen zu erreichen, die ein nicht zu vernachlässigendes Potential zur Betriebskostensenkung haben.

Nicht zuletzt soll auch der potenzielle touristische Imagegewinn – innovativ und regional, emissionsfrei und komfortabel, flüsterleise und CO₂-neutral / «Ein Schiff das wirklich Dampf macht!» – nachhaltig ausgeschöpft werden.

Das Projekt soll in drei, nachfolgend beschriebenen, Phasen umgesetzt werden. In einer ersten Phase sollen mit einem Modellprojekt die Grundlagen für ein Gesamtprojekt erarbeitet werden.

Dies umfasst u.a. Marktabklärungen einerseits in Bezug auf die Verfügbarkeit von nachhaltig produziertem Wasserstoff, wie auch die Abklärungen bezüglich der vorhandenen Marktpotentiale für den Einsatz auf einem Schiff. Zudem sollen technische Machbarkeitsstudien in Bezug auf die Versorgung, Transport sowie Lagerung des Wasserstoffs an Land Teil dieses Modellprojektes sein. Des Weiteren soll die Machbarkeit in Bezug auf die Implementierung von Wasserstoff im Schiff und deren Bedingungen geklärt werden. Dies betrifft v.a. die Abklärungen in Bezug auf die rechtlichen und schiffbaulichen Grundlagen zum Einsatz und Lagerung von Wasserstoff auf einem Schiff. Im Rahmen des Modellprojektes sollen auch potenzielle Kunden identifiziert und angesprochen werden. Aus dem Modellprojekt sollen ein Vorgehensplan und die Rahmenbedingungen für ein konkretes Vorprojekt hervorgehen.

Die Erkenntnisse aus dem Modellprojekt wären dann Basis für den nächsten Schritt in einem Vorprojekt, das eine Umsetzungsplanung anhand eines konkreten Bedarfs beschreiben soll.

Das abschliessende Haupt- oder Bauprojekt würde auf den Ergebnissen des Vorprojekts aufbauen und eine konkrete Umsetzung von dem beschriebenen Schiff mit einem Monitoring der Ergebnisse vorsehen.



2 Ausgangslage

Bei Neuentwicklungen oder grösseren Umbauten von Schiffen, im Speziellen auch auf Binnenschiffen (touristische Ausflugs- und Kurs-Fahrgastschiffe oder auch Lastschiffe, Ledischiffe oder Nauen) wird dem Energieverbrauch und der Energieerzeugung für Antriebs- und Bordsysteme immer grössere Aufmerksamkeit geschenkt. Dies mit dem Ziel Energieeinsparungen und Emissionsminderungen zu erreichen sowie ein nicht zu vernachlässigendes Potential zur Betriebskostensenkung und, nicht zuletzt auch, zum touristischen Imagegewinn, auszuschöpfen. Konventionelle Antriebs- und Energiesysteme, im speziellen von Fahrgastschiffen, beruhen bis heute fast ausschliesslich auf Dieselmotoren und zeichnen sich durch einen sehr hohen durchschnittlichen Energieverbrauch aus. Allein der Dieselmotorenverbrauch macht heute bei Fahrgastschiffen ca. 35-40% der gesamten Schiffsbetriebskosten aus. Dies sind die Voraussetzungen, warum Schiffseigner ein Interesse an alternativen Lösungen für eine nachhaltige und betriebskostenoptimierte Energieerzeugung/Antrieb haben. Es stehen nicht nur interessante ökonomische Aspekte im Vordergrund, sondern vor allem auch die strenger werdenden Vorschriften in Bezug auf Abgasemissionen (inkl. CO₂ Reduktion) sowie ein nicht zu vernachlässigender, potenzieller touristischer und allgemeiner Image Gewinn durch den Einsatz von nachhaltig erzeugter Energie. So kann u.a. gesagt werden, dass das Verantwortungsbewusstsein von Passagieren und Eignern in Bezug auf ein möglichst klimaneutrales Antriebssystem immer grösser wird. Hier kann eine Schifffahrtsgesellschaft mit entsprechenden Angeboten Märkte ausdehnen.

Vor diesem Hintergrund sind nachhaltige und klimaneutrale Energieträger, kombiniert mit einer hoch effizienten Energieumsetzung für Eigner von höchster Relevanz. Dies bei gleichbleibender Performance in Bezug auf die betrieblichen Voraussetzungen (Beschleunigungsvermögen, Geschwindigkeit, Komfort, usw.) sowie auch in Bezug auf die absolute Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Systeme.

2.1 Lösungsansatz

Weil bei der Vernetzung von elektrischen Energiesystemen und des dazugehörigen Powermanagements bereits eine sehr gute Basis für Optimierungsmöglichkeiten vorhanden ist, kann die Frage nach einer nachhaltigen Energienutzung auf Schiffen in folgenden Teilbereichen neu definiert werden:

- Wie wird die zu verwendende Primärenergie erzeugt?
- Wo wird die verwendete Energie erzeugt?
- Wie wird Energie aufs Schiff geführt?
- Wie wird Energie auf dem Schiff gelagert?
- Wie kann Energie auf dem Schiff so nutzbar gemacht werden, dass sie nach Möglichkeit mit Hilfe von existierenden Powermanagementkonzepten nutzbar gemacht werden kann?

Hier soll das Projekt «Helios» einen Ansatz aufzeigen. Trends in der Schifffahrt zeigen eine Elektrifizierung der Antriebe und Systeme an Bord, analog dem Strassenverkehr. Es stellt sich also die Frage, wie die elektrische Energie auf Schiffe kommt und wie diese gespeichert werden kann. Hier würde in einer ersten Betrachtung eine Lösung mit Batterien, wie sie zum Teil schon in Fahrzeugfähren in Skandinavien existiert, im Vordergrund stehen. Da aber der fahrplanmässige Kursbetrieb mit Passagierschiffen, wie er von den meisten Schifffahrtsgesellschaften in der Schweiz und in Europa angeboten wird, keine entsprechend langen Ladezeiten (an den Stationen) zulässt, ist diese Lösung kaum umsetzbar. Wegen der relativ geringen Energiedichte der Batterien (im Vergleich



zu chemischen Energieträgern) würde dies zudem eine auf einem Schiff nicht mehr vertretbare Zusatzmasse bedeuten.

Es stellt sich also die Frage, wie diese Batteriemasse so reduziert werden kann, dass sie zwar die hohen transienten Vorgänge im Schiffsbetrieb abdecken kann, aber nicht so gross ist, dass sie die ganze Energie für den Betrieb mit auf den Weg nehmen muss. Hier drängen sich also sogenannte Range-Extender-Konzepte auf, d.h. ein Erzeuger für elektrische Energie mit relativ geringer Leistung und so ausgelegt, dass er immer in einem optimalen Wirkungsgrad läuft, speist die Batterie, welche wiederum als Puffer dient, um die Verbraucher mit hoher Dynamik zu versorgen.

Die hier beschriebenen Anforderungen an die Stromproduktion erfüllt eine Brennstoffzelle in hohem Masse, wobei deren Versorgung mit nachhaltig und regional produziertem Wasserstoff (z.B. aus Wasser-, Photovoltaik- oder Windenergie) die gewünschten Effekte in Bezug auf die oben beschriebenen ökologischen Anforderungen erfüllt.

Analoge Antriebs-Konzepte in ähnlicher Leistungsklasse werden heute auch schon in der Passagier-Eisenbahntechnik (Alstom Coradia iLint, Siemens Mireo Plattform in Entwicklung) und bei LKW's im Strassenverkehr (coop CH, Toyota USA, Nikola USA, Kenworth USA), geplant oder umgesetzt oder stehen vor ihrem planmässigen Einsatz. Anzumerken ist aber, dass sowohl in der Bahn als auch auf der Strasse eine Rekuperation der Brems-Energie, anders als auf Schiffen, möglich ist. Einige Beispiele für Schiffe mit erneuerbaren Treibstoffen werden im Anhang beschrieben.

Im Projekt «Helios» sollen daher Wege beschrieben werden, wie auf Basis des Einsatzes von nachhaltig produziertem Wasserstoff, in Kombination mit einem innovativen, in der Basis bereits bestehendem, Powermanagement ein effizientes und nachhaltiges, elektrisch-hybrides Schiffsenergie- und Antriebssystem, basierend auf Batterien und Wasserstoff-Brennstoffzellen, eingesetzt werden kann. Somit kann das Projekt «Helios» unter folgender Zieldefinition betrachtet werden:

«Entwicklung und Nutzbarmachung von regional erzeugter erneuerbarer Energie mit nachhaltig produziertem Wasserstoff-als-Energieträger für ein neuartiges, CO₂-neutrales Schiffsantriebskonzept mit Elektroantrieb, Batteriepufferung und Brennstoffzellen».

Der Fokus soll dabei v.a. auf der Umsetzbarkeit wie auch auf der Praxistauglichkeit liegen. Dies schliesst die Produktion von nachhaltig und möglichst regional produziertem Wasserstoff sowie auch den Transport zur und die Lagerung bei der Schiffbunkerstation mit ein. Des Weiteren sind die technischen wie auch die regulatorischen Herausforderungen bei der Betankung, Lagerung und Nutzung des Wasserstoffes (Brennstoffzelle und Brennstoffzellenmanagement) auf dem Schiff von höchstem Interesse. Hier soll der Schwerpunkt in diesem Projekt liegen. Die eigentliche Energieumsetzung im Sinne der Nutzung der elektrischen Energie und dem Powermanagement als vernetztes System kann eine untergeordnete Rolle zukommen, da hier bereits existierende Konzepte aus diversen Shiptec-Projekten übernommen werden können (inkl. Simulationstools, usw.).

Neben den technischen Aspekten soll der Einsatz von nachhaltig produziertem Wasserstoff auch in Bezug auf seine ökonomische Einsetzbarkeit überprüft werden. Dieser Punkt ist für die langfristige Zukunft des Konzeptes von existenzieller Bedeutung.



3 Grundlagen

3.1 Modellschiff MS Saphir

Um das Projekt «Wasserstoffschiff» etwas fassbarer zu machen, wurden die Auslegungen und Berechnungen immer in Bezug zu einem Umbau des bestehenden Motorschiff MS Saphir der SGV AG gemacht.

Das MS Saphir ist eine dieselelektrisch betriebene Panoramayacht für 300 Passagiere. Die Hauptverhältnisse sind in nachfolgender Tabelle 1 beschreiben.

Hauptverhältnisse:		
Länge über alles	m	49.0
Breite über alles	m	8.30
Tiefgang beladen	m	1.09
Seitenhöhe	m	2.35
Fixpunkthöhe	m	7.25
Displacement des beladenen Schiffes nach AB-SBV ad Art. 22	t	147.4
Deckfläche	m ²	390.3
Fahrgastzahl	-	300
Besatzung	-	2
Dieseltankgrösse	l	5'500
Generatorenleistung	kW	3 × 192
Antriebsleistung	kW	2 × 180
Geschwindigkeit	km/h	28.0
Klasse	-	B
Baujahr	-	2012

Tabelle 1 Hauptverhältnisse MS Saphir

Der dieselelektrische Antrieb ist schematisch auf Abbildung 1 dargestellt. Die drei Generatoren liefern je eine maximale Leistung von 192 kW. Die beiden Antriebsmotoren haben eine Maximalleistung von je 180 kW und das Bordnetz bezieht maximal 60 kW. Von den drei Dieselmotoren sind jeweils zwei im Einsatz. Der dritte dient als Notgenerator, sollte einer ausfallen. Um die Betriebsstunden über die drei Motoren ausgeglichen zu halten, wechseln sich die Aggregate regelmässig im Betrieb ab.

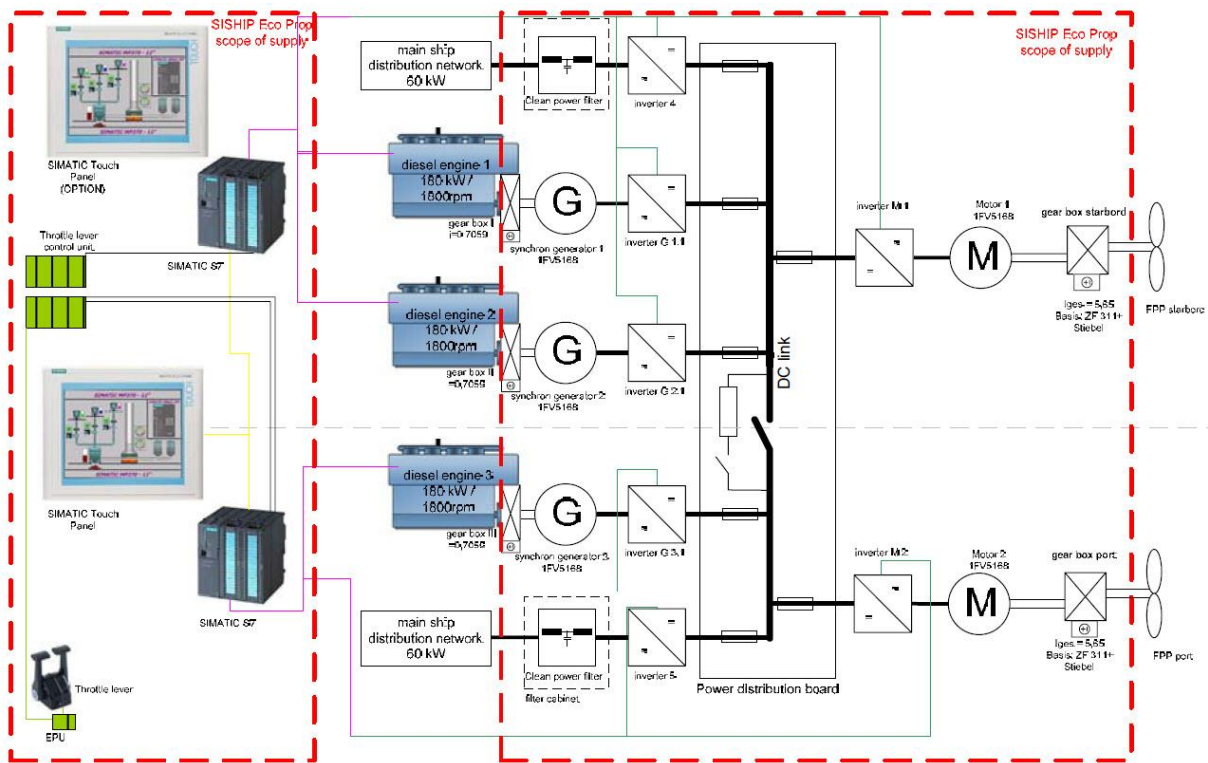


Abbildung 1 Schema dieselelektrischer Antrieb MS Saphir

3.1.1 Einsatzprofil MS Saphir

Der MS Saphir wird als Rundfahrtschiff mit einem regulären Halt betrieben. Es fährt stündlich einen Rundkurs vom Luzerner Seebecken aus in den Kreuztrichter des Vierwaldstättersees und wieder zurück. In der Hochsaison fährt es bis zu 10 Rundfahrten täglich. Das ergibt eine tägliche Einsatzdauer inklusive Vor- und Nachbereitung von ungefähr 14h. Die Liegedauer am Pier oder der Brücke beträgt demnach ca. 10h. Das Tankintervall des 5'500l Dieseltanks liegt bei durchschnittlich 11 Tagen. Aus operativen Gründen für die Betreiberin ist es das Ziel, ein Tankintervall von sieben Tagen nicht zu unterschreiten.

Es wurde eine Messung der abgegebenen Motorenleistung während eines gesamten Tages durchgeführt. Die kumulierte elektrische Energie der Generatoren für den Antrieb und das Bordnetz betrug 731 kWh. Dieser Wert wurde als Kennwert definiert, welcher ein alternativer Antrieb mit Wasserstoff, wie er in diesem Projekt vorgesehen ist, pro Tag leisten können muss.

Weiter wurden Leistungsspitzen von bis zu 271 kW gemessen. Ein alternatives Antriebssystem muss eine entsprechende Dynamik aufweisen, um diese Spitzen abdecken zu können.

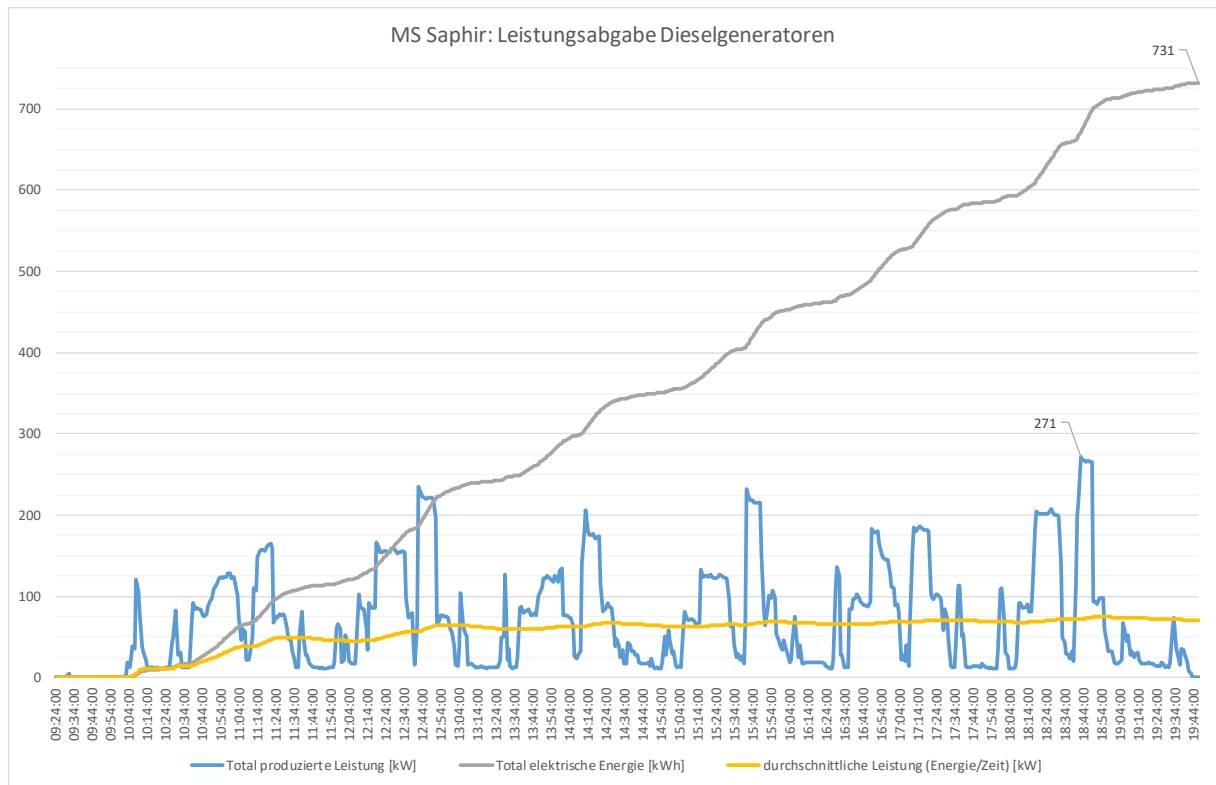


Abbildung 2 Leistungsabgabe Dieselgeneratoren MS Saphir

3.2 Vergleich Diesel – Wasserstoff

Grundlage für die Berechnung des Wasserstoffverbrauchs waren die Werte in Tabelle 2.

Leistung und Verbrauch	Diesel	Wasserstoff
Heizwert (kWh/kg)	11.9	33.3
Wirkungsgrad		
- Dieseltank – Treibstoffleitung – Dieselmotor – AC Generator – AC-DC Wandler	34%	
- H ₂ -Tank – Brennstoffzelle – DC-DC Wandler		48.5%
Verbrauch pro Woche (bei 731 kWh pro Tag +10% Reserve)	1391 kg 1706 l	349 kg

Tabelle 2 Leistung und Verbrauch von Diesel vs. Wasserstoff

Interessant ist auch der Vergleich der Gefahrenpotentiale beider Stoffe, wie er in Tabelle 3 gemacht wird. Diesel weist wesentlich mehr Gefahren- und Präventionshinweise auf als Wasserstoff, besonders auch im Hinblick auf Gewässerverunreinigung. Dies spricht für die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff für Schiffe anstelle von Diesel. Hingegen ist Diesel nur «entzündbar» und nicht «extrem entzündbar» wie der Wasserstoff. Dieser Unterschied schlägt sich in den Sicherheitsvorschriften für den Umgang mit Wasserstoff an Bord eines Schiffs einschneidend und nachteilig für Wasserstoff nieder.



Gefahrenpotential	Diesel	Wasserstoff
Gefahrenhinweise	H226 - Flüssigkeit und Dampf entzündbar H332 - Gesundheitsschädlich bei Einatmen H315 - Verursacht Hautreizungen H351 - Kann vermutlich Krebs erzeugen H304 - Kann bei Verschlucken oder Einatmen tödlich sein H373 - Kann Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition H411 - Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung	H220 - <i>Extrem</i> entzündbares Gas H280 - Enthält Gas unter Druck, kann bei Erwärmung explodieren
Prävention	P210 - Von Hitze/Funken/offener Flamme/heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen. P260 - Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol nicht einatmen. P280 - Schutzhandschuhe/Schutzkleidung und Gesichts-/Augenschutz tragen P273 - Freisetzung in die Umwelt vermeiden.	P210 - Von Hitze/Funken/offener Flamme/heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen.

Tabelle 3 Gefahrenpotential Diesel und Wasserstoff (BP / Pangas)



4 Wasserstoffproduktion

4.1 Quellen für Wasserstoffproduktion

Für die Gewinnung von Energie aus einer erneuerbaren Quelle steht die Wasserkraft im Vordergrund. Die erneuerbare Elektrizität wird in der Schweiz zum grössten Teil durch Wasserkraftwerke produziert. Es besteht eine grosse Anzahl von Kraftwerken, die zur Lieferung von nachhaltig produzierter elektrischer Energie für das Helios Projekt geeignet sind. Alternativ könnte auch Strom aus Windenergie, Photovoltaik oder Biomasse eingesetzt werden. Im Hinblick auf die Einfachheit der Logistik und die Transparenz der Herkunft sollte die Energie im Idealfall von einer einzelnen Anlage stammen, welche während dem ganzen Jahr eine ausreichende Produktion aufweist. Diese Bedingung ist bei einem Wasserkraftwerk mit entsprechender Produktionskapazität am besten erfüllt, da grosse Windparks und sehr grosse Photovoltaikanlagen in der Region kaum vorhanden sind.

Für den Betreiber eines Wasserkraftwerkes kann die Produktion von Wasserstoff (oder eines anderen chemischen Energieträgers) betriebliche und ökonomische Vorteile bedeuten. Wird die produzierte Energie nicht am Ort der Produktion genutzt, muss sie unmittelbar ins Netz eingespeist werden. Je nach Angebot und Nachfrage nach elektrischer Energie bewegen sich die Marktpreise nach oben oder unten. Bei grosser Überschussproduktion kann sich ein Strompreis von null oder sogar ein negativer Preis ergeben. Ohne Zwischenspeicherung oder Nutzung vor Ort bleibt dem Produzenten nichts anderes übrig, als den Strom ins Netz einzuspeisen und den Marktpreis zu akzeptieren.

Beim Wasserstoff besteht eine grundsätzlich andere Situation. Der Wasserstoff wird in der Regel am Ort der Produktion zwischengespeichert. Abhängig von der Grösse des vorhandenen Speichers kann die Nutzung des Wasserstoffs zeitlich von der Stromproduktion entkoppelt werden. Dadurch wird es möglich, Wasserstoff dann zu erzeugen, wenn der Marktpreis für die Netzeinspeisung tief ist. Durch die flexible Steuerung von Netzeinspeisung und Wasserstoffproduktion kann somit der durchschnittliche Erlös aus der verkauften Energie optimiert werden. Dadurch besteht auch auf der Produktionsseite ein Anreiz für die Produktion von Wasserstoff aus erneuerbarer Energie.

Weitere Möglichkeiten zur Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen basieren u.a. auf solarthermischer Energie, Sonnenlicht oder Biomasse (LBST/Hinicio, 2015).

Vom Ort der Produktion muss die Energie zum Schiff transportiert und dort gelagert werden. Dazu bestehen technisch verschiedene Möglichkeiten. Der rein elektrische Weg besteht im Transport des Stroms vom Kraftwerk über das Netz bis zum Schiffssteg. Dort wird der Strom mit einem Gleichrichter umgewandelt und auf dem Schiff in Batterien gespeichert. Dieser Pfad weist jedoch gewisse Nachteile auf. Wie oben bereits erwähnt wurde, benötigt die Aufladung der Batterien eine gewisse Zeit, welche bei einem Schiff nicht immer zur Verfügung steht. Für die Nutzung des Netzes fallen substantielle Gebühren an, welche die Betriebskosten des Schiffes erhöhen. Falls eine hohe elektrische Anschlussleistung benötigt wird, fallen Zusatzkosten für die Infrastruktur an. Die Batterien, welche für die Speicherung der Energie erforderlich sind, weisen ein nicht zu vernachlässigendes Gewicht auf. Deshalb ist die Speicherkapazität auf einem Schiff begrenzt, vor allem wenn es sich um einen Umbau handelt, bei dem die Raum- und Tragverhältnisse bereits gegeben sind. Die benötigte Kapazität der Batterien hängt von der angestrebten Reichweite des Schiffes ab (vergleiche Kapitel 3.1.1).

Für den Transport zum Schiff und die Speicherung der Energie stellt Wasserstoff eine Alternative zum elektrischen Weg dar. Er kann durch Elektrolyse am Standort eines Kraftwerkes hergestellt werden und auf der Strasse (Trailer) zum Schiff transportiert werden. Für die Speicherung auf dem Schiff stehen verschiedene Technologien zur Verfügung (siehe Kapitel 5.1).



4.2 Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse

Wasserstoff wird in vielen industriellen Anwendungen benötigt. Der überwiegende Teil wird durch Dampfreformierung aus Erdgas oder anderen fossilen Energieträgern produziert. Als nicht erneuerbare Energieform wird diese für die Helios-Schiffe nicht in Erwägung gezogen.

Die Herstellung von sogenannt grünem Wasserstoff erfolgt in der Regel durch die Wasserelektrolyse mit regenerativ erzeugtem Strom. In Elektrolyseuren wird dabei mit Gleichstrom Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Zur Anwendung kommen die alkalische Elektrolyse mit einem flüssigen basischen Elektrolyten (AEL), die saure Elektrolyse mit einem polymeren Festelektrolyten (PEMEL) oder die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) mit einem Festoxid Elektrolyten.

Die alkalische Elektrolyse wird seit ungefähr 100 Jahren kommerziell in der Industrie genutzt und stellt den Grossteil der weltweit installierten Kapazität dar.

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts sind Elektrolyseure mit einer protonenleitenden Feststoffmembran (Proton Exchange Membrane, PEM) als Elektrolyt verfügbar. Es handelt sich dabei also praktisch um die Umkehrung einer PEM-Brennstoffzelle. Die Vorteile der PEM-Elektrolyseure liegen in der hohen Stromdichte, der Möglichkeit zum Betrieb bei hohem Druck, die gute Eignung beim Betrieb in Teillast und die schnellen Reaktionszeiten. Kommerziell werden PEM-Elektrolyseure vorrangig in mittleren und kleineren Anwendungen (<300 kW) und in ersten Pilotanlagen auch in größeren Maßstäben (1 bis 6 MW) eingesetzt. Auf dem Markt sind heute kommerzielle Anlagen mit 1 MW Kapazität erhältlich. Diese werden für die Wasserstoffproduktion in der Modellstudie ausgewählt.

Die Hochtemperaturelektrolyse befindet sich im Labor- oder Versuchsstadium, sie ist industriell noch nicht erprobt und so noch nicht kommerziell verfügbar. Eine ausführlichere Beschreibung der Elektrolyse-Technologien findet sich in E4tech (2014) und in Teske et al. (2019).

Beim Projekt Helios wird davon ausgegangen, dass zeitgleich zum Schiffsumbau eine Elektrolyseanlage gebaut wird, welche in erster Linie der Versorgung des Helios-Schiffes und später von weiteren wasserstoffbetriebenen Schiffen dient. Da ein einzelnes Schiff einen relativ geringen Wasserstoffbedarf aufweist, wäre eine Produktion, welche ausschliesslich auf diese Menge ausgelegt ist, nicht sehr effizient. Ausgehend von der Empfehlung eines potentiellen Wasserstoff-Lieferanten, wird im Modellprojekt eine Leistung des Elektrolyseurs von 1 Megawatt angenommen. Für diesen Leistungsbereich gibt es verschiedene kommerziell erhältliche Produkte.

Um eine ausreichende Auslastung der Anlage zu erreichen, sollten weitere Abnehmer gefunden werden, welche idealerweise ein ähnliches Verbrauchsprofil aufweisen. Dies könnten zum Beispiel weitere wasserstoffbetriebene Schiffe von sein, die auf anderen Gewässern in der Region verkehren. Die in naher Zukunft geplanten Tankstellen für Strassenfahrzeuge sind ebenfalls mögliche Abnehmer für Wasserstoff. Zurzeit bestehen in der Schweiz verschiedene Projekte zur Produktion und Verteilung von nachhaltig produziertem Wasserstoff. Dazu gehört unter anderem ein geplantes landesweites Tankstellennetz für Strassenfahrzeuge. Mehrere Energieversorger bauen Prototypen für die Wasserstoffproduktion aus Wasserkraft. Weiter bestehen diverse Anlagen, welche mehrheitlich dem Bereich Forschung und Entwicklung zuzuordnen sind.

4.3 Stromerzeugung mit Brennstoffzellen

Während die Grundlagen der Brennstoffzelle schon seit mehr als 150 Jahren bekannt sind, wurde die kommerzielle Herstellung in grossen Zahlen erst in den letzten Jahren möglich. Hohe Kosten, geringe Lebensdauer der Materialien und fehlende Nachfrage waren bisher die wesentlichen Hindernisse bei der Einführung der Technologie.



Eine Brennstoffzelle produziert aus einem chemischen Energieträger (meist Wasserstoff) mittels einer effizienten elektrochemischen Reaktion zusammen mit Sauerstoff Elektrizität. Das einzige Reaktionsprodukt ist Wasser. Daneben entsteht bei der Reaktion Wärme. Falls diese Abwärme genutzt werden kann, ist der Gesamtwirkungsgrad sehr hoch.

Es gibt verschiedene Brennstoffzellen-Typen, die sich hauptsächlich in der Art des eingesetzten Elektrolyten und der Betriebstemperatur unterscheiden (Fuel Cell Today, 2012, DOE, 2016).

- Die Polymerelektrolyt Membran (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEM) Brennstoffzelle verwendet ein saures Polymer als Elektrolyt. Sie arbeitet in einem relativ tiefen Temperaturbereich bis ca. 120°C und wird bei vielen Anwendungen im tieferen Leistungsbereich eingesetzt.
- Die alkalische Brennstoffzelle (Alkaline Fuel Cell, AFC) verwendet eine wässrige Kaliumhydroxidlösung oder ein alkalisches Polymer als Elektrolyt. Der Temperaturbereich liegt unter 100°C.
- Die Phosphorsäure Brennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) arbeitet im Temperaturbereich von 150 – 200°C.
- Die Karbonatschmelzen Brennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) verwendet eine Lithium-, Natrium- oder Kalium-Karbonatschmelze als Elektrolyt und arbeitet im Bereich von 600 – 700°C.
- Die Festelektrolyt Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) besteht aus einem keramischen Festkörperelektrolyten und arbeitet bei Temperaturen von 500 – 1000°C.
- Ein Spezialfall ist die Direktmethanol Brennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC), welche wie der Name sagt an Stelle von Wasserstoff direkt mit Methanol betrieben wird. Sie ist vor allem für kleinere Leistungen geeignet und arbeitet in einem Temperaturbereich von 60 – 130°C.

In einer neueren Studie (DNV-GL, 2017) werden 23 Schiffsprojekte mit Brennstoffzellenantrieb beschrieben. Dabei handelt es sich sowohl um Konzeptstudien als auch um konkrete Bauprojekte und im Betrieb befindliche Schiffe. Neben Wasserstoff werden in diesen Projekten auch andere Treibstoffe wie Methanol, Diesel, flüssiges Erdgas und andere Kohlenwasserstoffe verwendet. Diese basieren zum Teil auf fossilen Rohstoffen und entsprechen damit nicht den Voraussetzungen, welche für das Projekt Helios gelten.

Bei den ausgewählten Projekten werden sieben verschiedene Typen von Brennstoffzellen eingesetzt. In einem qualitativen Ranking wurden in der Studie sowohl die technologischen, als auch die für den Schiffbau und -betrieb wichtigen Eigenschaften dieser Brennstoffzellen beurteilt. Die Protonenaustausch Membran (PEM) Brennstoffzelle erreichte dabei die höchste Punktzahl, aber auch die Bewertung der übrigen Typen lag nicht viel tiefer. Die Auswahl der Brennstoffzellen-Typen der verschiedenen realisierten Projekte zeigt, dass Vorgaben bezüglich Schiffstyp, -grösse und Lieferkette für den Treibstoff die Auswahl des Brennstoffzellen-Typs beeinflussen.

Für das Projekt Helios wird eine PEM Brennstoffzelle ausgewählt. Ihr Wirkungsgrad im Gesamtsystem wird zu 48.5% angenommen (vergleiche dazu Tabelle 2). Genauere Berechnungen sind Anhang 3 zu entnehmen.



5 Speicherung von Wasserstoff

5.1 Technologien

Für die Speicherung von Wasserstoff gibt es ein breites Spektrum von Möglichkeiten, welche alle ihre Vor- und Nachteile aufweisen. Grundsätzlich kann man zwischen der Speicherung in elementarer Form (d.h. Wasserstoff gasförmig oder flüssig) und in chemisch gebundenen Formen unterscheiden.

Zwei bedeutende Messgrößen für die Beurteilung von Wasserstoffspeichern sind der volumetrische und gravimetrische Faktor. Ersterer beschreibt das Verhältnis der gespeicherten Energie zum Raumvolumen des Speichermediums. Letzteres tut dasselbe mit dem Gewicht. In den nachfolgenden Kapiteln wurden diese Faktoren im System betrachtet, das heisst nicht nur das Speichermedium selbst, sondern als System inklusive Ventilen, Armaturen, Befestigungssystemen, etc.

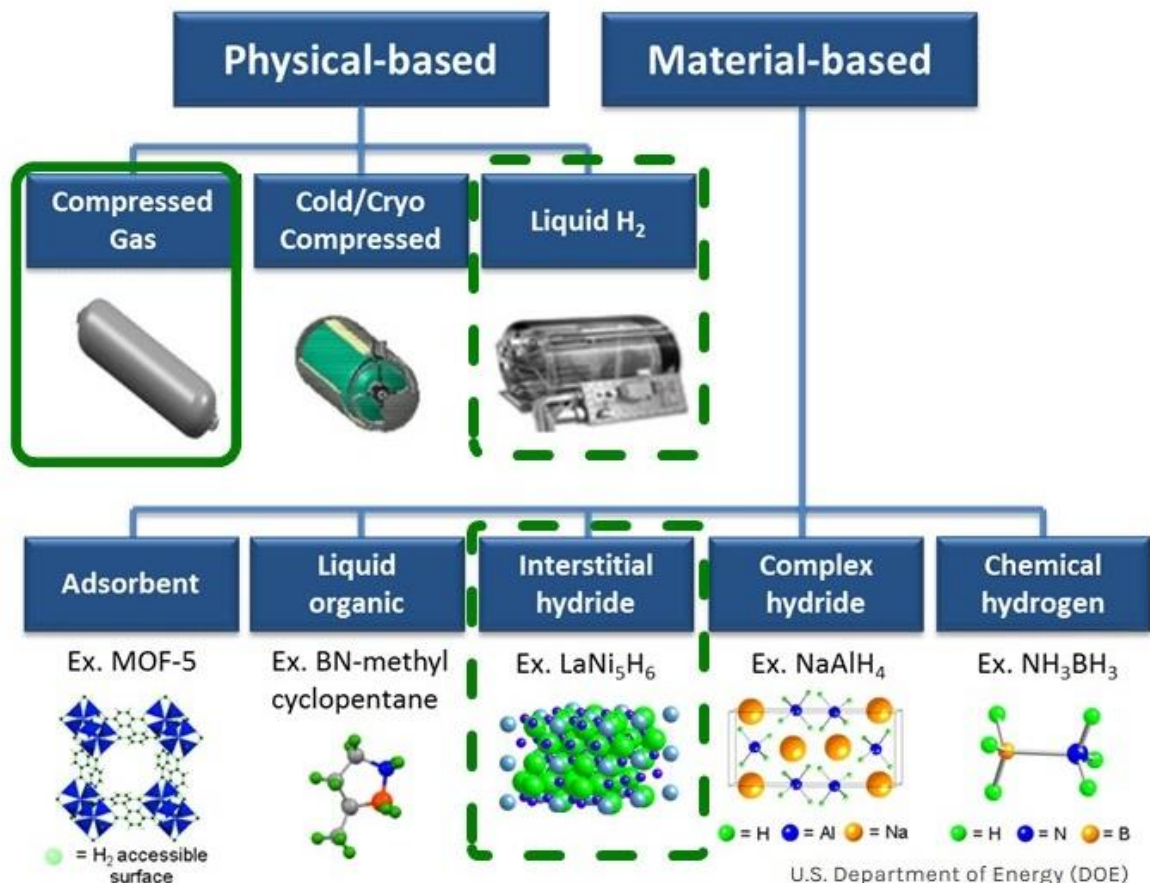


Abbildung 3 Unterscheidung der Speichertechnologien

5.1.1 Kryogene Energiespeicherung

Über einen weiten Bereich von Druck und Temperatur liegt Wasserstoff gasförmig vor. Bei Normaldruck liegt Wasserstoff bei Temperaturen unter -252,76°C flüssig vor. In flüssiger Form ist die Energiedichte pro Volumen des Wasserstoffs bedeutend höher als beim Gas. Allerdings wird für die Verflüssigung viel Energie benötigt und vor allem kleinere Anlagen sind wenig effizient. Da auf



absehbare Zeit in der Region keine Anlage zur Verflüssigung von nachhaltig produziertem Wasserstoff zur Verfügung stehen wird, wird diese Option nicht berücksichtigt.

Bei der sogenannten Methanisierung wird aus Wasserstoff und Kohlendioxid Methan hergestellt. Die benötigte Technologie wird zurzeit kommerzialisiert. Methan kann u. a. im Verbrennungsmotor eines Schiffes als Treibstoff eingesetzt werden. In Kreuzfahrtschiffen wird seit einiger Zeit teilweise Flüssiggas (LNG) als ein relativ sauberer fossiler Treibstoff eingesetzt. Bei entsprechenden Produktionsmengen könnte dieses durch synthetisches Methan ersetzt werden. Da diese Konzepte nur bei grösseren Produktionsmengen ökonomisch interessant sind, werden sie in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Für eine Speichermenge von 200kg Wasserstoff ergeben sich Speicherdichten von 1.73 kWh/kg und 0.88 kWh/l. Bei einer Speichermenge von 500kg Wasserstoff ergeben sich Speicherdichten von 2.80 kWh/kg und 1.14 kWh/l.

5.1.2 Feststoffbasierte Energiespeicherung

Wasserstoff kann chemisch an viele chemische Verbindungen gebunden werden. Für ein gut geeignetes Speichermaterial ist die Voraussetzung, dass die Bindung und erneute Freisetzung des Wasserstoffs mit einem möglichst geringen Energieverlust möglich ist. Darüber hinaus beeinflussen verschiedene Eigenschaften der Materialien deren Eignung als Wasserstoffspeicher. Dazu gehören unter anderen der Aggregatzustand, die spezifische Dichte, die Kosten und die Anforderungen an die Logistik.

Viele Metalle und Legierungen können grössere Mengen von Wasserstoff reversibel binden. Dazu gehören Leichtmetalle der Gruppen eins bis drei (z. B. Li, Mg, B oder Al), welche verschiedene komplexe Hydride bilden können. Auch Übergangsmetalle können komplexe Hydride bilden, welche für die Speicherung von Wasserstoff geeignet sind. Metallhydride weisen in Bezug auf den Wasserstoff eine hohe volumetrische Dichte auf. Für Speichermengen von 200 bzw. 500 kg Wasserstoff ergeben sich Speicherdichten von 0,37 kWh/kg bzw. 0,45 kWh/l (DASH™, GRZ Technologies SA, Sion).

Eine weitere Möglichkeit zur Speicherung von Wasserstoff besteht in der Hydrierung von (flüssigen) ungesättigten organischen Verbindungen, wie z.B. Toluol oder anderen aromatischen Verbindungen (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC). Im Gegensatz zu Metallhydridspeichern, welche üblicherweise am Ort des Verbrauchers mit angeliefertem gasförmigem Wasserstoff beladen werden, werden die organischen Wasserstoffträger am Produktionsort des Wasserstoffes beladen und anschliessend zum Verbrauchsort transportiert. Dort wird der Wasserstoff bei Bedarf katalytisch freigesetzt und der dehydrierte Wasserstoffträger wird anschliessend zur erneuten Beladung zurück transportiert.

Wasserstoff kann auch in verschiedenen chemischen Verbindungen wie z.B. Ameisensäure oder verschiedenen Borhydriden gebunden werden. Während bei ersterem bei der Freisetzung des Wasserstoffs nur Kohlendioxid als Nebenprodukt entsteht, müssen die Reaktionsprodukte aus den Borhydriden zurückgeführt werden, wodurch ein zusätzlicher Logistikaufwand entsteht. Diese Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung und wurden in der vorliegenden Studie nicht vertieft berücksichtigt.

5.1.3 Gasförmige Energiespeicherung

Wasserstoffgas hat eine geringe Energiedichte. Darum braucht es bei tiefen Drücken ein grosses Speichervolumen, was vor allem bei mobilen Anwendungen ungünstig ist. Aus diesem Grund wird Wasserstoff für die Speicherung komprimiert. Der gewählte Druck ergibt sich einerseits aus dem



Bedarf einer hohen Energiedichte und andererseits aus den Anforderungen an die Festigkeit und Dichtigkeit der Speicherbehälter. Traditionell wurden Gase in Stahlflaschen gespeichert, welche jedoch ein hohes Gewicht aufweisen. Als Alternative stehen heute Behälter aus verstärkten Kohlefaserverbundstoff zur Verfügung, welche wesentlich leichter als Stahlbehälter sind. In mobilen Anwendungen wie Personen- oder Lastwagen werden Behälter mit einem Nenndruck von 350 oder 700 bar eingesetzt. Diese sind kommerziell erhältlich und eignen sich auch für den Einsatz auf einem Schiff. Die energetischen Speicherdichten für Hexagon Composite Zylinder betragen bei 350 bar 2,26 kWh/kg und 0,36 kWh/l, bei 500 bar 1,78 kWh/kg und 0,43 kWh/l, bei 700 bar 1,80 kWh/kg und 0,40 kWh/l.

5.1.4 Batterie als Energiespeicher

Der Vollständigkeit halber wird ebenfalls noch kurz die Energiespeicherung mittels Batterie erwähnt. Die Batterie hat einen relativ hohen Wirkungsgrad im Vergleich zu den Wasserstoffspeichern. Der elektrische Strom kann mit einem Wirkungsgrad von ca. 92% in den Batterien gespeichert und mit ca. 94% Wirkungsgrad wieder entladen werden. Das ergibt einen Gesamtwirkungsgrad für Laden und Entladen von 86.5%.

Im Vergleich zu den Wasserstoffspeichern kann wenig Energie pro Volumen und Gewicht gespeichert werden. Bei einer Entladungstiefe von 80% (auch depth of discharge oder DOD genannt) kann mit den in diesem Projekt berücksichtigten Batteriemodulen von Leclanche (2017) 0.061 kWh/kg und 0.066 kWh/l gespeichert werden.

5.1.5 Zusammenfassung der Energiespeicher

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Speicher für gasförmigen Wasserstoff alle in einem ähnlichen Rahmen im Mittelfeld bewegen (Abbildung 4). Die Metallhydridspeicher bieten viel Speicherenergie auf kleinem Volumen, sind aber sehr schwer. Die Batterien bieten pro Volumen und Gewicht die kleinste Speicherkapazität. Kryogener Wasserstoff ist bei einer Menge von ca. 200kg vergleichbar mit den gasförmigen Speichern. Sobald die sich die zu speichernde Menge Wasserstoff erhöht, setzt sich kryogen gespeicherter Wasserstoff punkto Gewicht und Volumen deutlich von den anderen Technologien ab.

Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits ausgeführt, wurden kryogene und feststoffbasierte Speichertechnologien für dieses Projekt nicht weiterverfolgt.

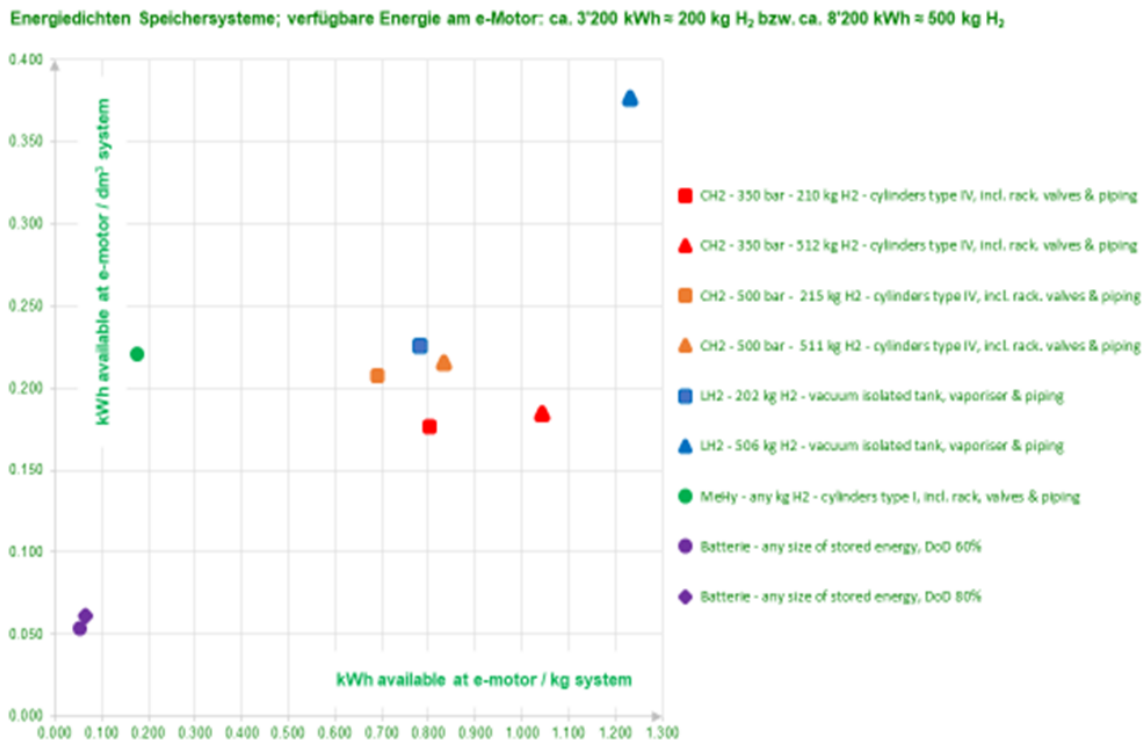


Abbildung 4 Übersicht Energiespeicher pro Volumen und Gewicht

5.1.6 Bewertungskriterien zur Auswahl der Energiespeicher

Neben den gravimetrischen und volumetrischen Faktoren wurden weitere Kriterien zur Auswahl des geeignetsten Speichers verwendet. Diese beinhalten den Reifegrad der Speichertechnologie, Verfügbarkeit des Träger- und Speichermediums, bereits realisierte Referenzprojekte in der Schifffahrt, Komplexität der Betankung und die Betankungsgeschwindigkeit. Letztlich wurden auch die wirtschaftlichen Aspekte des Träger- und Speichermediums bei der Auswahl berücksichtigt.

5.2 Gegebenheiten auf dem Modellschiff MS Saphir

Neben den theoretischen gravimetrischen und volumetrischen Faktoren entschied letztendlich zum Grossteil die effektive Form des zur Verfügung stehenden Aufstellungsraum über die finale Speichertechnologie. Die dichtest mögliche Packung der gesamten Wasserstoffspeicher ist bedeutender als die Werte eines einzelnen Speichers alleine.

Da das MS Saphir ein Einrumpfschiff ist, wurde aus stabilitätsgründen versucht das Gewicht des Wasserstoffspeichers im Rumpf des Schiffs und nicht beispielsweise auf dem Dach unterzubringen. Zusätzlich zu der Eindringtiefe, welche keine Installation von Systemen im äussersten Fünftel der Rumpfbreite erlaubt, gilt es zusätzlich für die Lagerung von gasförmigen Antriebsstoffen einen Mindestabstand von 800mm zur Aussenhaut einzuhalten (mehr dazu unter Kapitel 6.2.1.2). Dieser Sachverhalt ist in untenstehender Abbildung 5 dargestellt.

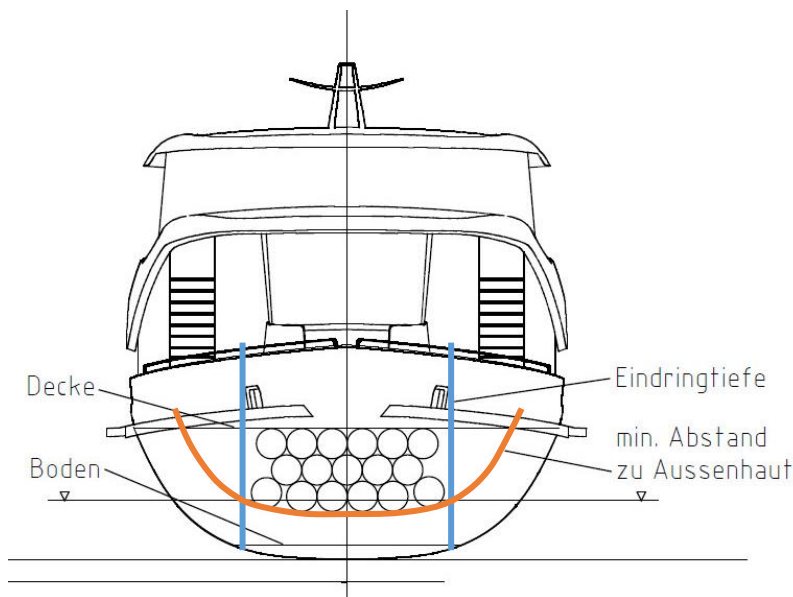


Abbildung 5 Eindringtiefe und Mindestabstand zur Aussenhaut

Ziel war es alle Wasserstoffkomponenten möglichst nahe beieinander aufzustellen und nicht über das gesamte Schiff zu versteilen. Das grenzt den Bereich eines möglichen Wasserstoffaustritts ein und reduziert die regulatorischen Auflagen auf wenige Bereiche im Schiff. Als grösster verfügbarer Raum wurde der bisherige HV Raum (elektrischer Hauptverteilungsraum) identifiziert. Er befindet sich zudem nahe an der breitesten Stelle vom Schiff, was durch die oben genannten Bedingungen mehr Raum freimacht als ein längerer aber schmalerer Raum wie beispielsweise der bisherige Generatorraum.

Eine weitere Gegebenheit des Modellschiffs, welche die Auswahl der Speichertechnologie beeinflusst, ist das Gewicht. Wie in Kapitel 6.2.6 ersichtlich ist, wird durch den Ausbau des konventionellen Antriebs ungefähr 9.2 t herausgenommen. Daraus ergab sich das Gewichtsbudget für den Einbau des kompletten Wasserstoffantriebsystems. Weitere Gegebenheiten ist das wie bereits unter Kapitel 3.1 erwähnte Tankintervall von 7 Tagen und dem täglichen Anschluss ans Landstromnetz von ungefähr 10 Stunden. Des Weiteren soll das Gefahrenpotential so tief wie möglich gehalten werden, was bei druckgespeichertem Wasserstoff eher für tiefere als höhere Drücke spricht.

5.3 Auswahl Speichertechnologie

Die dichtest mögliche Packung von gasförmigem Wasserstoff unter den vorhandenen Gegebenheiten aus Kapitel 5.2 und 6.2 sind 17 Flaschen vom Typ F von 350 bar im ehemaligen HV Raum untergebracht. Damit lassen sich 143kg Wasserstoff und, unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrads von 48.5%, eine nutzbare Energie von 2295kWh speichern. Bei einem Tankintervall von sieben Tagen ergibt das 328kWh pro Tag. Das reicht nicht aus um den täglichen Verbrauch von 731kWh aus Kapitel 3.1.1 zu decken.

Im Verlaufe des Projekts stellte sich die Frage, weshalb die elektrische Energie unter Wirkungsgradverlusten erst in Wasserstoff und anschliessend wieder zurück in elektrische Energie gewandelt wird und nicht direkt die elektrische Energie in Batterien auf dem Schiff gespeichert wird? Der erste Grund dafür sind die relativ tiefen gravimetrisch und volumetrischen Faktoren aus Kapitel 5.1.4 verglichen mit den Wasserstoffspeichern. Trotz des schlechteren volumetrischen Faktors können Batterien dennoch den Platz besser ausnutzen, da für sie nur die Begrenzung der Eindringtiefe, nicht aber der Mindestabstand von 800mm zur Aussenhaut gilt. Somit lässt sich im gleichen Raum absolut



mehr Energie mittels Batterien speichern als mit Wasserstoffdrucktanks. Das Gewicht des Speichers ist jedoch um ein vielfaches höher. Der zweite Grund ist die maximale Ladekapazität. Der «Betankungsvorgang» bei Batterien dauert ungleich länger als bei Wasserstoff. Die speicherbare Energie in Batterien ist abhängig vom maximal verfügbaren Ladestrom und der Ladedauer. Gewisse Landungsstege der Schifffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee (SGV) verfügen über einen Landnetzanschluss von maximal 125A. Bei 400VAC ergibt das eine Leistung von 86kW. Davon kann aus Erfahrung maximal 60kW zum Laden der Batterien verwendet werden. Der Rest wird für das Bordnetz des Schiffs benötigt. Bei 10h Liegezeit vom MS Saphir kann folglich maximal 600kWh elektrische Energie gespeichert werden, was ebenfalls nicht ausreicht um den täglichen Verbrauch von 731kWh aus Kapitel 3.1.1 zu decken.

5.3.1 Wasserstoffhybridsystem

Beim Einsatz von Brennstoffzellen zur Stromproduktion auf einem Schiff sind grundsätzlich zwei Antriebskonzepte möglich (Abbildung 6). Die Brennstoffzelle kann als Hauptstromquelle eingesetzt werden und der Antrieb erfolgt ausschliesslich mit Wasserstoff. Es ist nur eine kleine Batterie als Puffer nötig. Alternativ kann ein Schiff mit Strom aus dem Netz betrieben werden, der in einer Batterie an Bord gespeichert wird. Ein solches Konzept erfordert, je nach gewünschter Reichweite, grosse Batterien, die möglicherweise auf dem Schiff nicht untergebracht werden können. In diesem Fall kann eine Batterie mit einem Brennstoffzellensystem als Range Extender ergänzt werden, um die erforderliche Leistung zu liefern.

Da nur Wasserstoff oder nur Batterien für das Einsatzprofil vom MS Saphir nicht ausreichen Energie zur Verfügung stellen vermögen, hat man sich für dieses Projekt für ein Hybridsystem mit Wasserstoff als Range Extender entschieden.

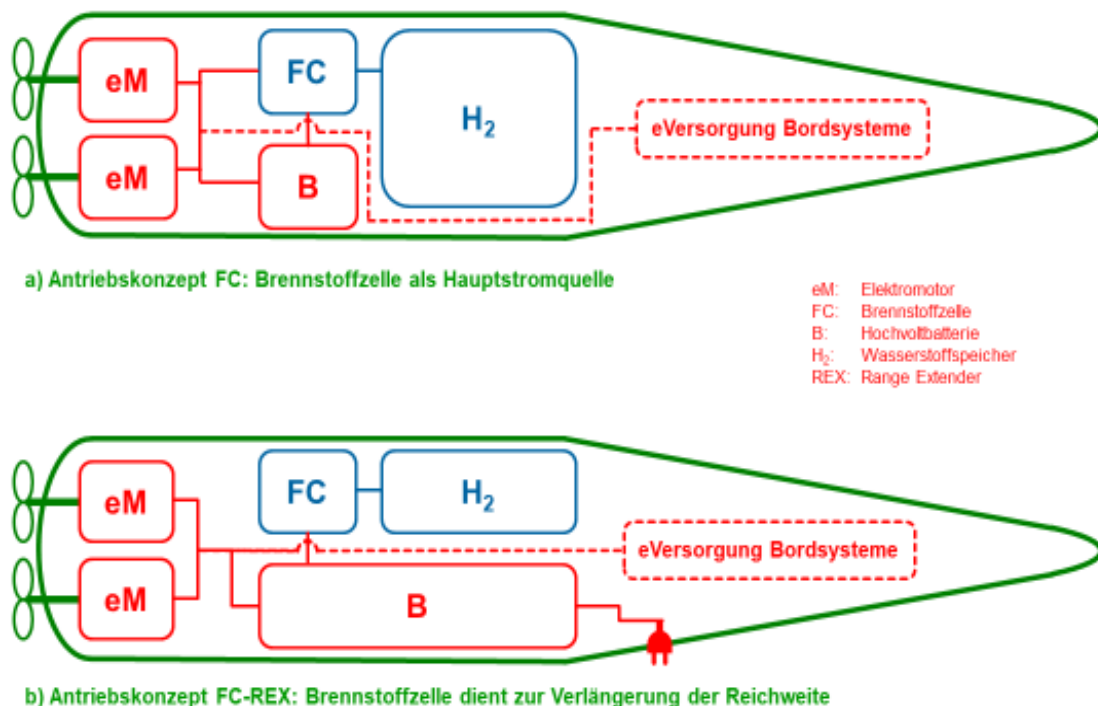


Abbildung 6 Antriebskonzepte FC – FC-REX



5.3.2 Entscheidungstreiber für Wasserstoffhybrid-Lösung

Im Rahmen des Projektes konnten drei treibende Kriterien festgestellt werden, welche die Entscheidung von reinem Batteriebetrieb, einer Hybridlösung oder einem kompletten Wasserstoffantrieb massgebend beeinflussen.

Betrachtet man die Wirkungsgradkette von der Herstellung der Energie bis zum Verbrauch auf dem Schiff, so hat Wasserstoff immer den schlechteren Wirkungsgrad als die Batterie. Das führt zur Überlegung, den elektrischen Strom nicht erst mit Verlusten in Wasserstoff umzuwandeln und dann wieder zurück in Strom, sondern so viel elektrischen Strom wie möglich direkt in Batterien auf dem Schiff zu speichern und Wasserstoff gegebenenfalls als Range-Extender zu verwenden. Die Auswahl ob ein Schiff rein mit Batterien oder mit Wasserstoff als Range-Extender betrieben werden kann oder gar komplett mit Wasserstoff betrieben werden muss, hängt hauptsächlich von folgenden Faktoren ab:

1. Stoppzeit und übertragbare elektrische Leistung

Je länger das Schiff pro Tag im Hafen liegt und an das Landstromnetz angeschlossen ist und je höher die übertragbare Leistung des Landstromnetzes ist, desto mehr Energie kann direkt in Batterien gespeichert werden. Üblicherweise verfügen Schiffe und Landungsbrücken der SGV über einen 125A Stromanschluss, was eine zu übertragende Leistung von 60 kW pro Stunde erlaubt.

2. Maximal zulässiges Gewicht

Batterien besitzen einen wesentlich tieferen gravimetrischen Faktor als Wasserstoff. Das bedeutet, dass pro Kilogramm Batterie weniger Energie gespeichert werden kann als pro Kilogramm Wasserstoffbehälter. Für Wasserstoff ist dieser Faktor wiederum abhängig von der gewählten Speichertechnologie. Flüssigwasserstoff ist gegenüber gasförmigem Wasserstoff leichter. Eine weitere Komponente des Gewichts, welche von Fall zu Fall separat betrachtet werden muss ist die Stabilität des Schiffs. Hierbei spielt die Positionierung der Komponenten eine grosse Rolle.

3. Maximal verfügbares Volumen

Batterien besitzen einen wesentlich tieferen volumetrischen Faktor als Wasserstoff. Das bedeutet, dass pro Liter Batterie weniger Energie gespeichert werden kann als pro Liter Wasserstoffbehälter. Für Wasserstoff ist dieser Faktor wiederum abhängig von der gewählten Speichertechnologie des Wasserstoffs. Flüssigwasserstoff benötigt gegenüber gasförmigem Wasserstoff weniger Volumen.

Dem gegenüber stehen die regulatorischen Anforderungen, welche der Wasserstoff mit sich bringt. Als gemeinsamen Nenner haben alle drei Faktoren die benötigte Energie auf dem Schiff. Je höher diese ist, desto höher werden die Faktoren.

5.3.3 Kostenvergleich der Speicher- und Trägermedien

Neben der technischen Begründung für die Wahl des Speichermediums muss auch die wirtschaftliche Komponente berücksichtigt werden. Generell kann gesagt werden, dass das konventionelle Speicher- und Trägermedium Diesel mit Abstand am günstigsten ist. Besonders bei konzessionierten Fahrten, wo zusätzlich zur Mehrwertsteuer auch die Mineralölsteuer abgezogen werden kann, ist die Energie, welche am Verbraucher ankommt, mit 0.25 CHF/kWh am günstigsten. Sobald die Mineralölsteuer nicht mehr abgezogen werden kann, wird Wasserstoff zu einer attraktiven Variante und der Antrieb mit Strom ab dem Landnetz ist sogar günstiger. Bezüglich Kosten für das entsprechende Speichermedium ist Wasserstoff gegenüber Batterien wesentlich günstiger. Jedoch ist bei dieser Kostenzusammenstellung zu berücksichtigen, dass nur die Kosten des jeweiligen Speichermediums ohne weitere Massnahmen wie z.B. Belüftung, Löscheinrichtung, etc. wie sie durch den Einsatz von Wasserstoff nötig werden, eingerechnet sind. Des Weiteren können die Preise abhängig vom Batterietyp, Flaschenmaterial, etc. stark von den in Tabelle 4 genannten Werten abweichen.



Speichermedium	CHF/kWh
Dieseltank	0.36
Druckwasserstoff 350bar	20.00
Batterie	1180.00

Tabelle 4 Kosten Speichermedium

Trägermedium	CHF/kWh Eingang	Wirkungsgrad	CHF/kWh Leistung am Verbraucher
Diesel (konzessioniert)	0.08	34%	0.25
Diesel (nicht konzessioniert)	0.16		0.48
Druckwasserstoff 350bar	0.28	48.5%	0.57
Strom (Niedertarif)	0.21	86.5%	0.43

Tabelle 5 Kosten Trägermedium

Für Diesel wurde ein Ausgangswert von 1.7 CHF/l inkl. MwSt. und Steuer zu Grunde gelegt. Für Wasserstoff wurde ein Einkaufspreis von 10 CHF/kg inkl. MwSt. angenommen.



6 Bedingungen auf dem Schiff (Modellschiff)

6.1 Regulatorische Voraussetzungen

Das eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und dessen Bundesamt für Verkehr (BAV) hat eine separate Ausführungsbestimmung zur Schiffbauverordnung für alternative Energieträger erlassen (AB-SBV, Teil II). Sie thematisiert die speziellen Anforderungen, die der Einsatz von alternativen Energieträgern wie Wasserstoff mit sich bringen. In dieser stützt sie sich für viele Themen auf die «Anwendung der anerkannten Regeln der Technik». Ein Gespräch mit Herrn Georg Höckels vom BAV, Sektion Schifffahrt am 02. April 2019 hat bestätigt, dass die Regeln einer Klassifikationsgesellschaft diese Anforderungen erfüllen. Die AB-SBV, Teil II ist somit als Zusatzanforderung an alternative Energieträger vom BAV zu verstehen, die zusätzlich zu den Regeln und Richtlinien der Klassifikationsgesellschaften gelten.

Beim Bau eines Schiffes dürfen nicht mehrere Regelwerke von verschiedenen Klassifikationsgesellschaften miteinander vermischt werden. Das Modellschiff MS Saphir wurde anhand des Germanischen Lloyds (GL) berechnet und ausgelegt. Es ist daher naheliegend, für das Projekt Helios wieder dieselbe Klassifikationsgesellschaft zu wählen. Überdies hat der GL in der Vergangenheit bereits einige Projekte zum Thema Wasserstoffantrieb begleitet und sein Regelwerk entsprechend erweitert.

Die DNV GL ist ein Zusammenschluss der beiden Klassifikationsgesellschaften Det Norske Veritas (DNV) und dem Germanischen Lloyd (GL). Beide vormals eigenständigen Gesellschaften hatten Regeln oder Richtlinien im Umgang mit Brennstoffzellen auf Schiffen. Seit Januar 2016 steht an ihrer Stelle die DNV GL "rules for classification of Ships: Part 6 Chapter 2 Section 3: Fuel cell installation – FC" (DNVGL-RU-SHIP-Pt.6 Ch2). Die überarbeiteten DNV GL - Brennstoffzellenregeln haben die Prinzipien der vorherigen DNV - Brennstoffzellenregeln beibehalten (z. B. risikobasierter Ansatz für die Brennstoffzelle selbst und vorgeschriebene Anforderungen für Schiffsdesign, Rohrleitungen, Treibstofflagerung) und wurden in Kombination mit den vorherigen Versionen von DNV-Brennstoffzellenregeln und der GL-Brennstoffzellenrichtlinie (GL Richtlinie VI-3-11) entwickelt. Die GL Richtlinie VI-3-11 für den Einsatz von Brennstoffzellen-Systemen an Bord von Wasserfahrzeugen aus dem Jahr 2002 ist somit nicht mehr gültig. Sie kann heute nur noch für bereits GL klassifizierte Schiffe verwendet werden.

Während in der Sektion 3 spezifisch die Anforderungen und Vorschriften für die Brennstoffzelle jeglichen Gases geregelt sind, ist für das Projekt Helios auch die Sektion 5 «Gas fuelled ship installations – Gas fuelled» aus der DNVGL-RU-SHIP-Pt.6 Ch.2 relevant. In dieser Sektion werden die allgemeinen Regeln für den Umgang mit Erdgas als Kraftstoff festgelegt. Namentlich geht es um die Leitungsführung, Belüftung, Bunkerung und Lagerung von Erdgas, die zum Antrieb verwendet werden. Die Regeln der Sektion 5 gelten zwar explizit nur für Anlagen, in denen Erdgas als Brennstoff verwendet wird. Sie schreibt aber auch, wenn andere Gase als Brennstoff verwendet werden, sind möglicherweise weitere besondere Überlegungen erforderlich. Die Sektion 5 wird deshalb im Rahmen dieses Projekts als Leitfaden für die Auslegung miteinbezogen, um bereits möglichst viele Grundlagen im Umgang mit Gas als Brennstoff abzudecken. Würde das Projekt umgesetzt, müsste mit der Klassifikationsgesellschaft den Inhalt dieses Kapitels auf die konkrete Anwendbarkeit für einen Wasserstoffantrieb detailliert besprochen werden.

Bezüglich Brandschutz verweist die DNVGL-RU-SHIP-Pt.6 Ch.2 grundsätzlich auf die internationale Brandschutzanforderung SOLAS CH.II-2, macht seinerseits aber noch einige wenige ergänzende Vorschriften.



6.2 Räumliche Voraussetzungen

In diesem Kapitel wird das Wasserstoffantriebskonzept für einen Umbau von MS Saphir beschrieben. Die Zeichnungen zu jedem Unterkapitel befinden sich in Anhang 4 bis 7.

6.2.1 Gaskonzept

Möglichst wenige Räume sollen mit Wasserstoff in Berührung kommen, um die geforderten Sicherheitsvorkehrungen soweit es geht zu reduzieren. Wie bereits im Kapitel 5.2 beschreiben, wird der bisherige HV Raum aufgelöst und zum Lagerraum und Brennstoffzellenraum umfunktioniert. Der HV Raum ist neu im früheren Generatorraum untergebracht. Im ehemaligen HV Raum wird ein Querschott eingebaut um den Wasserstofflagerraum von dem Brennstoffzellenraum zu trennen. Die AB-SBV, Teil II fordert, dass der Raum mit der Brennstoffzelle keine Verbindungstür zum Lagerraum des Wasserstoffs haben darf. Die Brennstoffzelle ist zudem in einer zusätzlichen gekapselten Umhüllung unterzubringen.

Ferner sollen Räume mit Brennstoffzellen und Räume zur Lagerung von Wasserstoff gegenüber anderen Räumen auf dem Schiff luftdicht abgetrennt sein. Der Zugang zum Brennstoffzellenraum muss unabhängig und direkt von einem offenen Deck gewährleistet werden (DNV-GL, 2018). Ist das nicht der Fall, muss der Raum durch eine Luftschleuse betreten werden können. Die Fläche der Luftschleuse muss mindestens 1.5m² betragen, nach aussen belüftet und überwacht sein. Elektrische Komponenten im nicht gefährlichen Bereich müssen ausgeschaltet werden, wenn der Unterdruck im gefährlichen Bereich verloren geht. Folglich dürfen elektrische Betriebsmittel, die zur Aufrechterhaltung der Hauptfunktionen oder Sicherheitsfunktionen des Schiffes erforderlich sind, nicht in durch Schleusen geschützten Räumen aufgestellt werden, es sei denn, das Gerät ist ein zugelassener sicherer Typ. Da die Antriebsmotoren im Raum neben dem Brennstoffzellenraum nicht zugelassene sichere Typen sind, wurde der Brennstoffzellenraum Mittschiff mit einem Längsschott getrennt. Steuerbordseitig werden die Brennstoffzelle und die Druckreduzierung untergebracht. Backbordseitig wird der Raum erneut getrennt, um eine Luftschleuse zu erhalten, die somit nicht direkt in den Raum der Antriebsmotoren öffnet. Die bestehende Luke in der Decke des alten HV Raums wird in den backbordseitigen Raum vor der Luftschleuse verschoben.

Die Decke vom Unterdeck des Modellschiffs MS Saphir ist zugleich der Holzboden des oberen Raums und daher nicht luftdicht. Es wird deshalb in diesem Bereich eine 4mm dicke Stahlplatte an die Decke geschweisst um diese Anforderung zu erreichen. Die Decke soll so ausgestaltet sein, dass es möglichst zu keiner Gaskonzentration in Nischen kommen kann und es darf zu keinem Zeitpunkt zu einer Oberflächentemperatur im Raum vom über dem Selbstentzündungspunkt kommen.

Die Betankung ist beidseitig hinter der Ausladung möglich. Die Tankleitungen sind die einzigen, welche Wasserstoff durch einen nicht explosionsgefährdeten Raum (Gastrorum) führen. Die Leitungen sind entsprechend dem nächsten Kapitel ausgeführt.

6.2.1.1. Leitungsführung und Überdruckauslass

Alle Leitungen welche Wasserstoff durch einen nicht explosionsgefährdeten Bereich führen, müssen doppelwandig und im Zwischenraum mit Inertgas gefüllt sein. Das Inertgas muss drucküberwacht sein. Wird ein Leck detektiert (Wasserstoff oder Inertgas) muss der betroffene Abschnitt automatisch von einem Ventil abgesperrt werden.

Der Überdruckleitungsauslass muss ein Drittel der Schiffsbreite oder 6m, welcher Wert grösser ist, über dem Wetterdeck und mindestens 6m über den Arbeits- und Passagierbereichen liegen. Der Auslass muss mindestens 10m entfernt von jeglichen Belüftungsein- und auslassen und Öffnungen zu benutzen Flächen oder nichtgefährlichen Bereichen haben.



6.2.1.2. Lagerung

Die AB-SBV, Teil II fordert bei Einrumpfschiffen unbeschadet der geforderten Eindringtiefe einen Mindestabstand zur Aussenhaut von 0.8m für Wasserstofftanks und Rohrleitungen. Es ist davon auszugehen, dass mit der Aussenhaut nicht nur die vertikalen Aussenbleche, sondern auch die Bodenbleche gemeint sind. Der Grund für diese Forderung ist darauf zurückzuführen, dass im Falle einer Grundberührung kein Leck im Gassystem entsteht. In wie weit eine Möglichkeit besteht ob dieser Mindestabstand bei entsprechender Verstärkung und Versteifung der Aussenhaut in Bereich der Tanks reduziert werden kann und darf, ist bei einem konkreten Projekt mit dem BAV zu klären.

6.2.2 Lüftungskonzept

Räume mit Brennstoffzellen müssen genügend durchlüftet werden, damit es zu keiner kritischen Konzentration von Wasserstoff kommen kann. Die Belüftung hat von und nach aussen zu führen. Die Zuluft muss von unten zugeführt und die Abluft von oben weggeführt werden. Die Ventilatoren müssen so angeordnet sein, dass die Luft abgesogen und nicht eingepumpt wird und ein leichter Unterdruck entsteht. Dies wird umgesetzt, indem die Öffnung der Zuluft kleiner dimensioniert wird als es für die Leistung der Ventilatoren in der Ablaufleitung erforderlich wäre. Die Ein- und Auslässe der Ventilation müssen mindestens 1.5m voneinander entfernt sein.

Der Lüftungsumsatz muss genügend gross sein um die Gaskonzentration unter dem Flammpunkt zu halten, sollte es zu einem Leck im System kommen (5.3.1.2). In Sektion 5, Kap. 6.1.2 sind für Tankräume 30 Luftwechsel pro Stunde definiert. Angrenzende Räume müssen mit mindestens 8 Luftwechsel pro Stunde separat belüftet sein. Die Ventilatoren müssen für den Einsatz in einer Wasserstoffgasumgebung zugelassen sein. Die Lüftung muss vertikal oder stetig steigend ohne scharfen Richtungswechsel erfolgen, um Gasansammlung in der Leitung zu vermeiden. Es müssen zwei Ventilatoren mit unterschiedlicher Stromversorgung für die Entlüftung der Brennstoffzelle einbaut werden. Es genügt nicht nur zu überwachen ob die Lüftung läuft oder nicht, sondern es muss der Volumenstrom und der Unterdruck im Brennstoffzellenraum gemessen werden.

Sollte die Lüftung ausfallen oder der Unterdruck im Brennstoffzellenraum verloren gehen, muss es zu einer automatischen Abschaltung der Wasserstoffzufuhr in den Brennstoffzellenraum kommen.

6.2.3 Brandschutzkonzept

Grundsätzliche gelten alle bestehenden Brandschutzanforderung auf dem Schiff. Der Brandschutzplan im Anhang 6 erläutert lediglich die zusätzlichen Anforderungen durch Wasserstoff.

Brandmeldeanlage

Es sind Brandmelder im Brennstoffzellenraum, im Lagerraum und in den Luftschleusen zu installieren. Da Wasserstoff ohne Rauch, nahezu unsichtbar für das menschliche Auge und mit sehr wenig Wärmestrahlung abbrennt, sind speziell für Wasserstoff ausgelegte Brandmelder zu installieren. Ein herkömmlicher Rauchmelder ist nicht zulässig.

Gasüberwachungsanlage

Es sind Gasmelder im Brennstoffzellenraum, im Lagerraum und in den Luftschleusen zu installieren. Im Falle eines Gaslecks muss dies auf der Brücke, dem Kontrollraum und dem Raum selbst angezeigt werden. Es hat eine automatische Abschaltung der Anlagen des betroffenen Bereichs zu erfolgen.

Manuelle Notabschaltung

Eine manuelle Notabschaltung bedeutet die Wasserstoffzufuhr zum Brennstoffzellenraum zu unterbrechen und alle möglichen Zündquellen in diesem Raum auszuschalten. Die manuelle



Notauslösung soll vor unbeabsichtigter Betätigung geschützt im Brennstoffzellenraum und Tankraum installiert werden.

Sicherheitsprozedere

Im Falle eines Brandes muss sofort die Luftzufuhr mittels den Brandschutzklappen sowie die Wasserstoffzufuhr in den betroffenen Raum gekappt und die Löscheinrichtung ausgelöst werden. Des Weiteren müssen alle elektronischen Verbraucher im Raum automatisch stromlos gemacht werden.

Löschanlage

Es ist eine festinstallierte Löschanlage zu installieren. Um einen Wasserstoffbrand zu löschen ist eine geeignete feststoffbasierte Anlage zu installieren.

6.2.4 Ex-Zonenplan

Als gefährliche Bereiche werden all jene Bereiche bezeichnet, die entweder im Normalfall Wasserstoffgas führen oder möglicherweise in einem normalen oder abnormalen Fehlerfall Wasserstoffgas führen können. Diese gefährlichen Bereiche sind in drei Zonen unterteilt. Je nach Zone müssen darin die Zündquellen durch elektrische Geräte minimiert werden und es dürfen nur für die entsprechende Zone zugelassene Elektrogeräte installiert sein. Die Zoneneinteilung für das Modellschiff MS Saphir befindet sich in Anhang 7.

Die seitlichen Ex-Zonen an den Tankstutzen sind zeitlicher auf die Dauer der Betankung begrenzt.

Zugang von einem nicht explosionsgefährdeten zu einem explosionsgefährdeten Bereich ist nicht gestattet. Wo solche Zugänglichkeit nötig ist, muss der nicht explosionsgefährdete Bereich mit einer Luftschleuse vom explosionsgefährdeten Bereich getrennt werden. In nicht explosionsgefährdeten Bereichen mit Zugang zu explosionsgefährdeten Bereichen, in denen der Zugang durch eine Luftschleuse geschützt ist, müssen elektrische Geräte, die nicht für Ex-Zonen zugelassen sind, bei Verlust des Unterdrucks in der Luftschleuse im Gefahrenbereich stromlos gemacht werden.

6.2.5 Betankungskonzept

Die Betankung ist mitunter einer der risikoreichsten Prozessschritt im gesamten System, denn hier wird das sonst geschlossene System bewusst und durch den Menschen geöffnet. Dabei können mit geringer Wahrscheinlichkeit Fehler passieren. Der Tankstutzen ist in diesem Schritt das kritischste Element. In den letzten Jahren wurde im Automobilbereich hierzu jedoch wesentliche Fortschritte erzielt, wovon nun andere Industrien wie auch die Schifffahrt profitieren können. Die Fortschritte betreffen die Tankverbindung, Druck- und Temperatenausgleich zwischen den Systemen, Drucküberwachung und Gasetektoren.

Es ist geplant die Betankung mit einer mobilen Tankstation durchzuführen. Es sind Lösungen am Markt erhältlich, bestehend aus einem Tankstellencontainer und einem Tankcontainer. Der Tankstellencontainer verfügt über einen Pufferspeicher von ungefähr 100kg Wasserstoff und wird am gewünschten Ort aufgestellt. In diesem Projekt wäre dies auf oder zu Beginn eines Werftstegs der SGV. Der Tankcontainer wird direkt neben dem Tankstellencontainer aufgestellt und angeschlossen. Er fungiert als erweitertes Tankreservoir für die Tankstelle und kann je nach Bedarf per LKW zum Tankstellencontainer hinzugestellt und angeschlossen werden. Sein Fassungsvermögen entspricht in etwa 300kg Wasserstoff.



6.2.6 Gewichts Betrachtung

Durch den Ausbau des konventionellen Dieselantriebs (Generatoren, Abgasanlage, Fundamente, Dieseltank) werden ungefähr 9.2t ausgebaut.

Bei einem Umbau vom MS Saphir auf Wasserstoffhybridantrieb werden knapp 16.1t eingebaut. Das ergibt ein Gewichtszuwachs von 6.9t.

Grösste Gewichtsanteile sind mit 6.3t die Batterien, gefolgt von den Wasserstofftanks mit 2.2t und einer zusätzlichen Stahldecke im Lager- und Brennstoffzellenraum von 1.4t. Könnte mehr Wasserstoff und weniger Batterien verbaut werden, könnte das Gewicht stark reduziert werden. Durch den Umbau müssen Quer- und Längsschotte und Luftschleusen eingebaut werden, die bei einem Neubau und entsprechend anderen Planungsmöglichkeiten weggelassen werden könnten. Das Einsparungspotential beläuft sich in diesem Fall auf knapp 3t.

6.2.7 Stabilitäts Betrachtung

Die entfernten und neu eingebauten Komponenten beeinflussen neben dem Gesamtgewicht auch den Schwerpunkt des Schiffs. Auf Basis der Stabilitätsberechnung des MS Saphir wurde eine Stabilitätsabschätzung für dieses Projekt durchgeführt. Die Intakt- wie auch die Leckstabilität sind mit dem neuen Gewicht und Schwerpunkt, welche ein Umbau auf einen Wasserstoffantrieb mit sich bringen, sind für diese Phase des Projekts nach wie vor mit ausreichender Sicherheit gegeben. Detailliertere Informationen dazu befinden sich in Anhang 8.



7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten eines Umbaus vom bestehenden MS Saphir auf einen Wasserstoffhybridantrieb inklusive Initialkosten für eine Tankstelle belaufen sich auf schätzungsweise CHF 4.4 Mio. Die Mehrkosten bei einem Neubau betragen ungefähr CHF 3.6 Mio. Siehe dazu Tabelle 6.

Es wird erwartet, dass die Preise für Wasserstoffkomponenten (Tankstelle, Brennstoffzelle, Speicher, etc.) in den nächsten zehn Jahren um ca. 50% einbrechen werden.

Bei der Berechnung der Investitionskosten zur Umstellung auf Wasserstoff sollte eine langfristige Flottenbetrachtung gemacht werden. Sind die Erstinvestitionskosten für die Tankstelleninfrastruktur einmal geleistet oder werden sie auf mehrere Schiffe verteilt, sinken die Mehrkosten für einen Wasserstoffantrieb besonders bei einem Neubau stark.

Investitionskosten MS Saphir	Stand 2019 (in Mio. CHF)		Prognose 2029 (in Mio. CHF)	
	Umbau	Neubau	Umbau	Neubau
Infrastruktur Tankstelle	1.9		1	
Wasserstoff-System auf Schiff	0.5		0.3	
Batterien für Hybrid	0.6		0.5	
Umbau MS Saphir	1.4	-	1.6	-
Mehrkosten Neubau MS Saphir	-	0.6	-	0.7
Total	4.4	3.6	3.4	2.5

Tabelle 6 Investitionskosten MS Saphir

7.2 Betriebskosten

Auf Abbildung 7 sind die Betriebskosten pro Kraftstoff für den jährlichen Betrieb vom MS Saphir dargestellt. Wie bereits in Kapitel 5.3.3 erläutert, ist die günstigste Variante momentan nach wie vor der Antrieb mit steuerbefreitem Diesel auf konzessionierten Strecken. Das vorgeschlagene Wasserstoffhybridsystem kann bei den Betriebskosten für den MS Saphir mit einem Dieselantrieb auf nicht konzessionierten Strecken mithalten.

Es ist zu erwarten, dass die Preise für Wasserstoff in den nächsten zehn Jahren um bis zu 80% fallen werden. Dies ist vor allem gestützt auf die Entwicklung im Bereich der Wasserstoffproduktion in China (Bloomberg, 2019). Auf der anderen Seite ist ein Anstieg des Dieselpreises zu erwarten, gestützt auf die bisherige Preisentwicklung seit 1950 (Zukunft Mobilität, 2010), die diskutierte CO₂-Steuer (Zukunft Mobilität, 2019) und die allgemeine politische Stimmung.

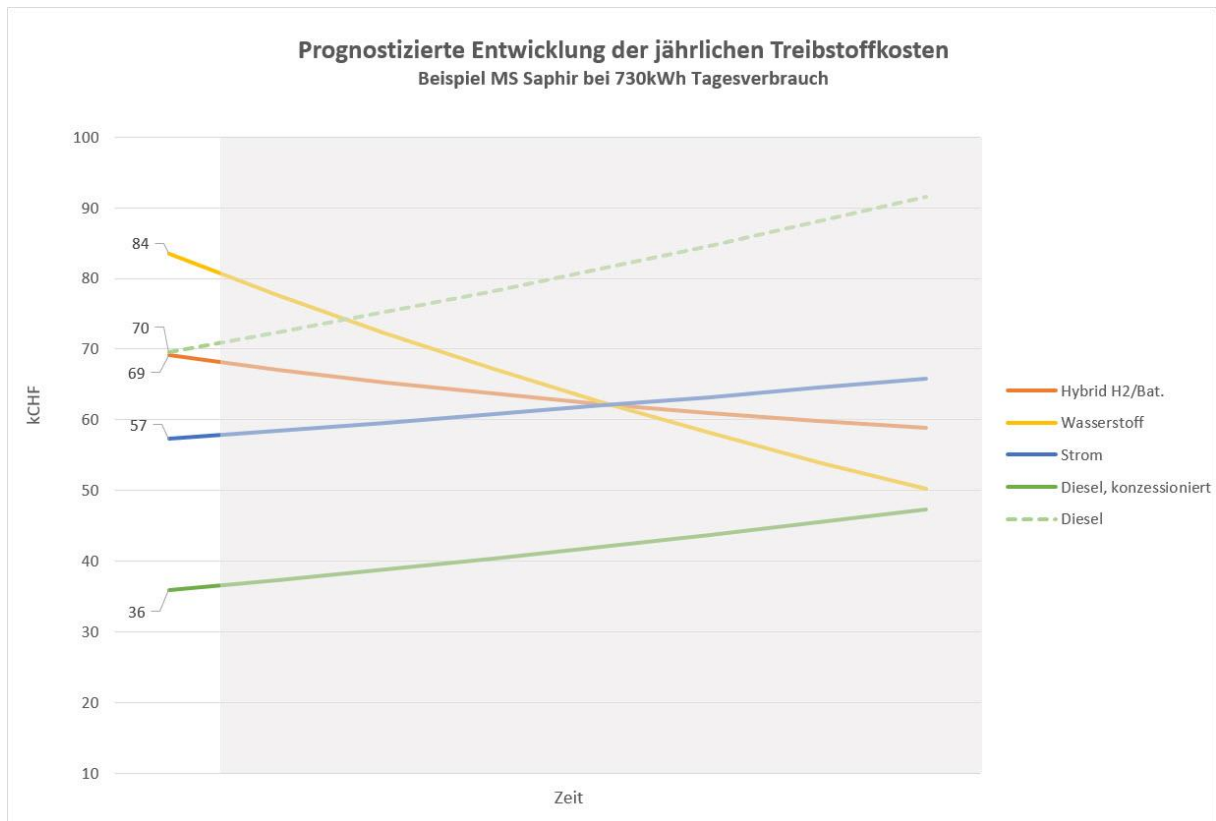


Abbildung 7 Prognostizierte Entwicklung der jährlichen Treibstoffkosten

Wie bereits bei den Investitionskosten sind auch die Betriebskosten im Zusammenhang einer gesamten Flotte zu betrachten. Eine Lösung mit Wasserstoffhybrid- oder gänzlichem Batterieantrieb ist aus heutiger Sicht günstiger als nur Wasserstoff. Für ein einzelnes Schiff mag diese Überlegung zutreffen. Werden weitere Schiffe mit Wasserstoffhybrid- oder Batterieantrieb betrieben, bedingt dies, dass jedes Schiff über Nacht an einem leistungsstarken Stromanschluss angeschlossen werden kann. Ist diese Infrastruktur nicht vorhanden, muss diese geschaffen und in die Investitionskostenrechnung miteinbezogen werden.

7.3 Kritische Würdigung zur Gesamtenergieeffizienz

Aus der reinen Optik des Wirkungsgrads, ist die Batterie klar die energieeffizienteste Variante, gefolgt vom Wasserstoff. Der produzierte Strom wird über das Stromnetz ohne weitere Umwandlung via Batterie mit einem Wirkungsgrad von 86.5% direkt an den Verbraucher geführt. Beim Wasserstoff ist der Wirkungsgrad vom Wasserstoffspeicher zum Verbraucher mit 48.5% deutlich tiefer, wobei hier der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs zur Herstellung des Wasserstoffs sowie dessen Transport zum Schiff noch nicht eingerechnet ist. Dem gegenüber stehen der Energieaufwand und die anfallenden Abfallstoffe bei der Herstellung und Recycling der Batterien. Eine solche Energiebilanzbetrachtung wurde im Rahmen dieses Projekts nicht durchgeführt.



8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Projekt hat gezeigt, dass sich ein Fahrgastschiff auf einem Schweizer Binnensee durchaus ökologisch, sprich schadstoffneutral, mit Wasserstoff betreiben lässt. Nicht nur der CO₂-Ausstoss wird vermieden, sondern auch jegliche anderen Schadstoffe wie beispielsweise Stickoxide und Feinstaub.

Neben der Schadstoffreduktion ist auch eine deutliche Lärm- und Vibrationsreduktion zu erwarten. Dies wirkt sich positiv auf den Komfort der Passagiere und der Crew, wie auch die Anwohner von Schiffslandestellen aus.

Aus einem ökonomischen Gesichtspunkt sind die Investitions- und Betriebskosten noch höher im Vergleich zu einem konventionellen Dieselantrieb. Bei einem Wasserstoffhybrid sind die Betriebskosten heute ca. 1.9, bei einem reinen Wasserstoffschiff 2.3 Mal höher. Bei allen Komponenten des Antriebssystems kann in den kommenden Jahren dank steigenden Produktionszahlen mit tieferen Kosten gerechnet werden. Das selbe gilt für die Elektrolyseure, was wiederum geringere Kosten für die Herstellung von Wasserstoff bedeutet. Die wahrscheinliche Einführung von Lenkungsabgaben auf fossilen Brenn- und Treibstoffen wird die Konkurrenzfähigkeit des Wasserstoffantriebes weiter verbessern, so dass mittelfristig mit einer breiten Einführung der nicht-fossilen Antriebe zu rechnen ist.

Der komplett schadstofffreie Betrieb des Schiffes wird von den Autoren auch als sehr grosser Imagegewinn für die Betreibergesellschaft eingeschätzt, vor allem auf einem See in einer weitgehend intakten Naturlandschaft, wie es beim Vierwaldstättersee der Fall ist. In wieweit sich dieser Imagegewinn monetarisieren lässt, ist in einem nächsten Schritt zu klären.

8.1 Nächste Schritte nach Projektabschluss

Die ökonomischen Faktoren können allenfalls mit dem Imagegewinn ausgeglichen werden. Es ist der Frage nachzugehen, wie viel die Passagiere bereit sind mehr zu bezahlen für eine Fahrt mit einem schadstoffneutralen Schiff.

Die Gesetzgebung wird in den nächsten Jahren weiter in Richtung Emissionsreduktion und Förderung alternativer Energien gehen; sei es mit strikteren Abgasgesetzen wie in der aktuellen Überarbeitung der Verordnung über die Anforderungen an Schiffsmotoren auf schweizerischen Gewässer (VASm) oder dem derzeit im Parlament diskutierten CO₂-Gesetz. Eine weitere Komponente ist der Zeitgeist der Gesellschaft, welcher eine kritische Auseinandersetzung mit und eine Verminderung der bestehenden Umweltbelastung fordert. Eine Schifffahrtsgesellschaft wird sich früher oder später mit diesen Themen auseinandersetzen müssen. Ein Schiffsneubau mit konventionellem Dieselantrieb für einen konzessionierten Schiffsbetrieb, besonders wenn er in irgendeinem Masse von der öffentlichen Hand mitfinanziert wird, ist zusehends unwahrscheinlicher.

Es besteht die Idee, eine Interessengemeinschaft für Wasserstoffmobilität in der Schweizer Binnenschifffahrt zu gründen. Diese hätte beispielsweise die Förderung von Wasserstoffprojekten für Binnenschiffe, Wissensaustausch unter den Betreibergesellschaften, einheitliche Ausbildungsgrundlagen und ein Einkaufskonglomerat für Wasserstoff zum Ziel. Sie könnte die Gesetzgebung zudem positiv in der Ausgestaltung und Umsetzung mitgestalten, in dem sie dem Gesetzgeber einen einheitlichen Ansprechpartner bietet.



9 Referenzen

BAV (2015), Teil II der Ausführungsbestimmungen des UVEK zur Schiffbauverordnung, UVEK, Bern, Schweiz

Bloomberg (2019), Hydrogen's Plunging Price Boosts Role as Climate Solution, www.bloomberg.com/news/articles/2019-08-21/cost-of-hydrogen-from-renewables-to-plummet-next-decade-bnef

DNV - GL, (2017), Study on the Use of Fuel Cells In Shipping (for the European Maritime Safety Agency), DNV - GL Maritime, Hamburg, Deutschland

DNV - GL, (2018), Part 6 Additional class notations: Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems, DNV - GL Maritime, Hamburg, Deutschland

E4tech Sàrl and element energy (2014), Development of Water Electrolysis in the European Union, Final Report, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking

Fuel Cell Today (2012), Fuel Cell Basics, Technology Types, www.fuelcelltoday.com

LBST/Hinicio, (2015), Study on Hydrogen from Renewable Resources in the EU, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH und Hinicio S.A., Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Final Report, July 2015

Leclanche (2017), Marine Rack System (MRS), Brochure, Leclanché SA, Yverdon les Bains, Switzerland

Sandia (2016), Joseph W. Pratt and Lennie E. Klebanoff, Feasibility of the SF-Breeze: a Zero-Emission, Hydrogen Fuel Cell, High Speed Passenger Ferry, SAND2016-9719, Sandia National Laboratories, Livermore, California

Sandia (2018), Joseph W. Pratt and Leonard E. Klebanoff, Optimization of Zero Emission Hydrogen Fuel Cell Ferry Design, With Comparisons to the SF-BREEZE, SAND2018-0421, Sandia National Laboratories, Livermore, California

S. L. Teske, M. Rüdisüli, Ch. Bach, T. J. Schildhauer, Potentialanalyse Power-to-Gas in der Schweiz, Bericht Empa (Dübendorf) & Paul Scherrer Institut (Villigen PSI), 2019

U.S. Department of Energy (DOE), Fuel cell Technologies Office (2016), Comparison of Fuel Cell Technologies

Zukunft Mobilität (2010), Entwicklung der Treibstoffpreise in Deutschland 1950 – 2009, <https://www.zukunft-mobilitaet.net/2268/benzinpreis-entwicklung-dieselpreis-tanken/benzinpreis-dieselpreis-deutschland-entwicklung-1950-2009/>

Zukunft Mobilität (2019), CO2-Steuer – Worüber streitet die Politik überhaupt?, <https://www.zukunft-mobilitaet.net/170251/konzepte/ausgebliebene-minderaloelsteuererhoehung-co2-steuer-bvwp-verkehrsprognose-verkehrsverflechtungsprognose/>

BP (2019), Sicherheitsdatenblatt Diesel, https://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_ch/PDF/BP%20City%20Diesel_DE_SWITZERLAND%2025.11.2013.pdf

Pangas (2019), Sicherheitsdatenblatt Wasserstoff, https://www.pangas.ch/de/images/pangas_sdb_wasserstoff-60_d_tcm553-115273.pdf





10 Anhänge

10.1 Anhang 1: Wasserstoff

Wasserstoff liegt unter Normalbedingungen als Gas vor. Das Wasserstoffmolekül H_2 ist das leichteste existierende Molekül. Aus diesem Grund ist die Energiedichte pro Volumen von gasförmigem Wasserstoff sehr gering, was für die Lagerung, vor allem bei begrenzten Raumverhältnissen, ungünstig sein kann.

Daten

Element	Ordnungszahl 1 Atomgewicht 1,0079 Chemische Formel H_2	
Dichte	0,0899 kg/Nm ³	70,79 kg/m ³ LH ₂
Siedepunkt	20,39 K / -252,76 °C @ 0,1013 MPa	
Heizwert H _i (unterer Heizwert, LHV, H _u)	33,3 kWh/kg	119,972 MJ/kg
	3,00 kWh/Nm ³	10,8 MJ/Nm ³
	2,359 kWh/l LH ₂	8,495 MJ/l LH ₂
Brennwert H _s (oberer Heizwert, HHV)	39,4 kWh/kg	141,800 MJ/kg
	3,54 kWh/Nm ³	12,75 MJ/Nm ³
	2,790 kWh/l LH ₂	10,04 MJ/l LH ₂
Explosionsgrenze in Luft	4,0 – 77,0 Vol.-%	
Detonationsgrenze in Luft	18,3 – 58,9 Vol.-%	
Zündtemperatur	833 K / 585 °C	
stöchiometrische Mischung	29,5 %	
minimale Zündenergie	0,017 mJ	
Diffusionskoeffizient	0,61 cm ² /s	



Energieträger Wasserstoff – Daten & Eigenschaften



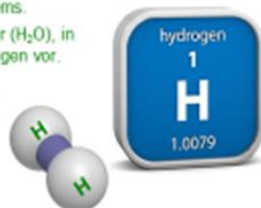
Wasserstoff ist das leichteste und häufigste Element des Universums (93% der vorhandenen Atome und 75% der Masse, meistens im atomaren Zustand H). Wasserstoff besteht aus einem Proton und einem Elektron. Mit dem Atomgewicht 1 steht er am Anfang des Periodensystems.

Auf der Erde kommt Wasserstoff wegen seiner Reaktivität ausschliesslich in chemisch gebundener Form, z. B. als Wasser (H_2O), in den verschiedensten Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Biomasse usw.) oder in anderen organischen Verbindungen vor. Wasserstoff macht aufgrund der geringen Atommasse aber nur 0,12 % der Masse der Erde aus.

Wasserstoff wird selten rein in Form des zweiatomigen Moleküls (H_2) gefunden. Nur unter Einsatz von Energie kann der chemisch gebundene Wasserstoff freigesetzt werden. So wird Wasserstoff zu einem Energiespeicher oder Energieträger.

Die Brennbarkeit von Wasserstoff ist darum Ausdruck der Eigenschaft, dass Wasserstoff ein Energieträger/-speicher ist. Reiner Wasserstoff ist aber weder explosionsfähig noch sonst reaktiv. Er benötigt stets einen Verbindungspartner.

Ein wichtiges Gefahrenmerkmal von Wasserstoff ist darum seine Fähigkeit explosive Gasgemische zu bilden.



Daten

Element	Ordnungszahl 1 Atomgewicht 1,0079 Chemische Formel H_2
Dichte	0,0899 kg/Nm ³ 70,79 kg/m ³ LH_2
Siedepunkt	20,39 K / -252,76 °C @ 0,1013 MPa
Heizwert H_u (unterer Heizwert, LHV, H_u)	33,3 kWh/kg 119,972 MJ/kg 3,00 kWh/Nm ³ 10,8 MJ/Nm ³ 2,359 kWh/l LH_2 8,495 MJ/l LH_2
Brennwert H_o (oberer Heizwert, HHV)	39,4 kWh/kg 141,800 MJ/kg 3,54 kWh/Nm ³ 12,75 MJ/Nm ³ 2,790 kWh/l LH_2 10,04 MJ/l LH_2
Explosionsgrenze in Luft	4,0 – 77,0 Vol.-%
Detonationsgrenze in Luft	18,3 – 58,9 Vol.-%
Zündtemperatur	833 K / 585 °C
stöchiometrische Mischung	29,5 %
minimale Zündenergie	0,017 mJ
Diffusionskoeffizient	0,61 cm ² /s

Eigenschaften – Sicherheitsaspekte

Wasserstoff ist	• nicht detonativ im Freien • nicht selbstentzündlich • nicht zerfallsfähig • nicht oxidierend • nicht brandfördernd • nicht giftig • nicht radioaktiv • nicht überlischend • nicht ansteckend • nicht wassergefährdend • nicht fruchtschädigend • nicht krebserzeugend
	• ist leichter als Luft und entweicht schnell nach oben
	• hat einen hohen Diffusionskoeffizienten und verdünnt sich rasch in Luft
	• hat deutlich engere Detonations- als Explosionsgrenzen – bei früher Zündung brennt er, bevor die Detonationsgrenzen erreicht werden
	• brennt mit unsichtbarer Flamme, die sehr wenig Wärme abstrahlt
	• ist farb-, geruch- und geschmacklos



10.2 Anhang 2: Schiffsprojekte mit erneuerbaren Antriebsstoffen

In den folgenden Abschnitten werden einige Projekte vorgestellt, welche beispielhaft die verschiedenen Antriebssysteme und die Methoden der Bereitstellung von erneuerbarem Wasserstoff oder anderen erneuerbaren Energieträgern für den Schiffsbetrieb aufzeigen.

U-Boote der Klasse 212 A

Die deutschen U-Boote der Klasse 212 A sind die ersten, welche mit einem Brennstoffzellenantrieb versehen sind. Die erste Einheit wurde 2004 in Dienst gestellt. Der Brennstoffzellenantrieb dient für einen geräuscharmen und langen Taucheinsatz. Der Wasserstoff wird in einem Hydridspeicher gelagert und der Sauerstoff wird in flüssiger Form mitgeführt. Die PEM-Brennstoffzellen wurden von Siemens geliefert und der Hydridspeicher stammt vom Werftunternehmen Howaldtswerke-Deutsche Werft AG. Daneben sind die U-Boote auch mit einem Dieselgenerator und einer Blei-Säure-Batterie ausgestattet.

HySeas III, Schottland

Im Rahmen des EU-Projektes HySeas III wird eine wasserstoffbetriebene Fähre für rund 120 Passagiere und 18 Fahrzeuge gebaut. Sie soll zwischen den schottischen Inseln Orkney und Shapinsay verkehren. Auf den Orkney Inseln wird bereits heute ein Überschuss von erneuerbarer Energie aus Wind-, Wellen- und Gezeitenkraftwerken produziert. Diese soll zur Versorgung des Schiffes mit erneuerbar hergestelltem Wasserstoff dienen.

Hydroville, Belgien

Die «Hydroville» ist ein kleiner Katamaran der Compagnie Maritime Belge (CMB), welcher als Personenfähre dient und im Jahr 2017 auf der Schelde in Belgien in Betrieb genommen wurde (www.hydroville.be). Sie ist mit einem Dual-Fuel-Verbrennungsmotor ausgestattet, welcher den Einsatz von Wasserstoff oder Diesel erlaubt. Der Wasserstoff wird gasförmig in Tanks bei 200 bar gespeichert. Die «Hydroville» dient als Pilotprojekt für grössere Hochseeschiffe, welche mit demselben Antriebskonzept betrieben werden sollen. Der Betreiber schätzt den Wasserstoff-Verbrennungsmotor im Vergleich zu einem Brennstoffzellen-Antrieb als besser geeignet ein.

Verschiedene kleinere Boote

In verschiedenen Ländern sind bereits kleinere Boote mit Wasserstoff und Brennstoffzellenantrieb gebaut worden (DNV - GL, 2017). Diese dienen meist als Prototypen zur Erprobung der Technologie.

Norled Fähre, Norwegen

Eine Fähre mit Brennstoffzellenantrieb und Flüssigwasserstoff wird zurzeit für den norwegischen Fährnbetreiber Norled geplant. Die Kapazität soll bei 299 Passagieren und 80 Personenwagen liegen. Sie soll im Jahr 2021 in Betrieb genommen werden.

Machbarkeitsstudien der Sandia National Laboratories

In den Jahren 2016 bis 2018 wurden von den Sandia National Laboratories in Livermore, California, verschiedene Machbarkeitsstudien für wasserstoffbetriebene Schiffe durchgeführt (Sandia 2016, Sandia 2018). Aufgrund der hohen Energiedichte wurde flüssiger Wasserstoff für die Speicherung gewählt. Mittels Brennstoffzellen wird die Elektrizität für den Antrieb gewonnen. Es wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass alle untersuchten Schiffstypen mit der existierenden Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie machbar sind.

“Water-go-Round Project” in San Francisco

Bis 2020 soll in der Bucht von San Francisco ein Ausflugschiff und Pendler-Fähre als Katamaran mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb in Betrieb gehen (www.watergoround.com). Die rund 260 kg



Wasserstoff werden in 200 bar Drucktanks auf dem Dach gespeichert. Der Katamaran soll für 84 Passagiere zugelassen werden. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 22 Knoten; der Antrieb besteht aus zwei elektrischen Motoren mit 300 kW Leistung, die mit einer 360 kW PEM-Brennstoffzelle und 100 kWh Li-Ion-Batterie gespeist werden.

MS Innogy, Essen (Methanol, Brennstoffzelle)

Mit dem Schiff „MS Innogy“ soll die gesamte Wertschöpfungskette von lokal produziertem erneuerbaren Strom für den Betrieb eines Ausflugsschiffes auf dem Baldeneysee in Essen demonstriert werden. Im Rahmen des „greenfuel“ Projektes wurde 2017 der Antrieb eines bestehenden Schiffes durch eine Methanol-Brennstoffzelle der Firma SerEnergy A/S (Aalborg, DK) ersetzt. Das Methanol für den Antrieb wird direkt beim Wasserkraftwerk Baldeneysee durch eine elektrobio-katalytische Synthese hergestellt. Dieses Verfahren befindet sich noch in einer frühen Entwicklungsphase (TRL 4-5).

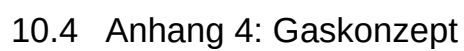


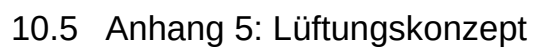
10.3 Anhang 3: Kenndaten MS Saphir – Effizienzpfade

Kenndaten MS Saphir – Effizienzen / Effizienzpfade

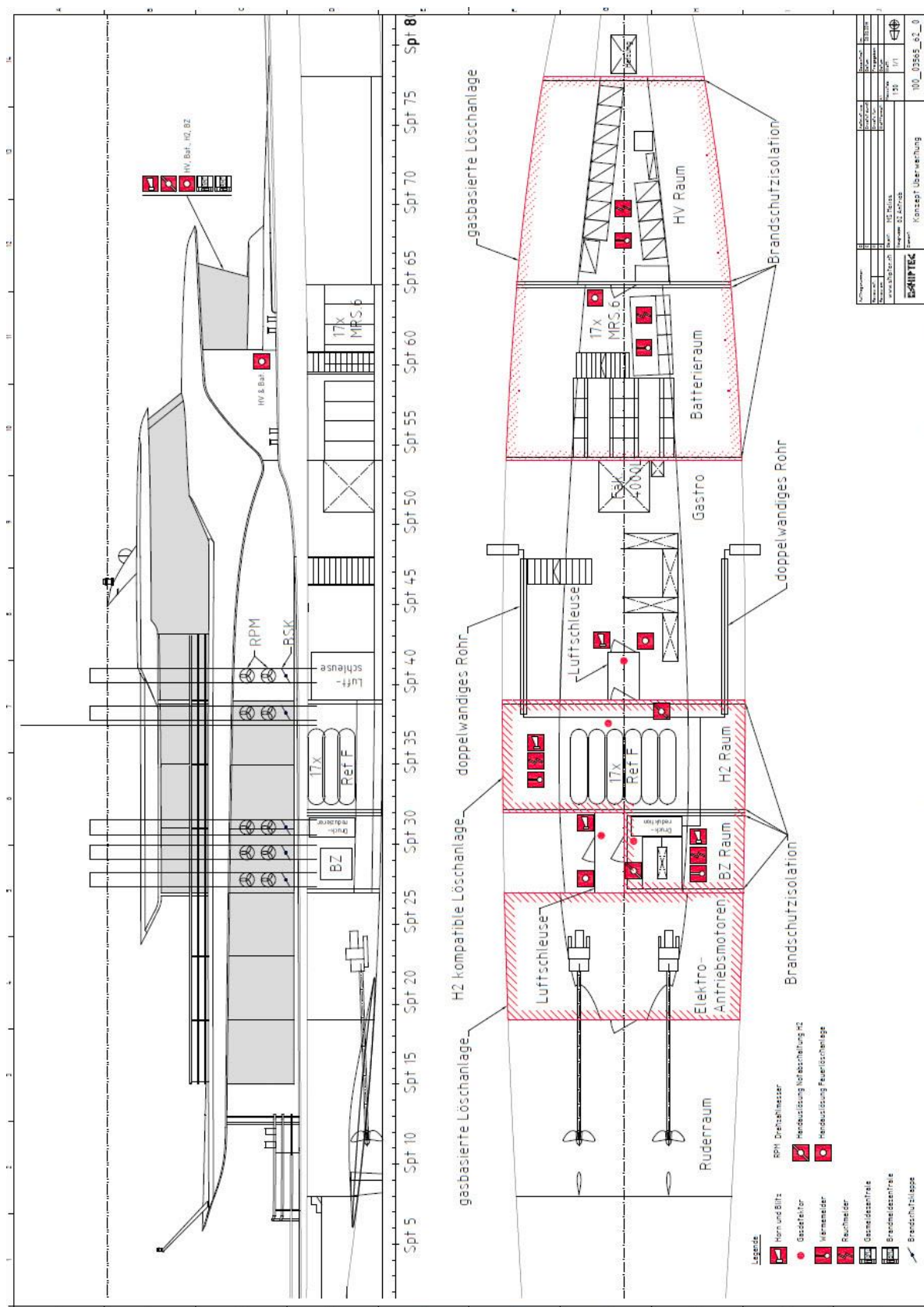


• Länge über alles	m	49,00	• Wasserstoff	Heizwert H_i / LHV	33.3 kWh/kg
• Breite über alles	m	8,30	• Effizienzen, bezogen auf LHV:		
• Tiefgang beladen	m	1,09	– Dieselmotor		24 %
• Seitenhöhe	m	2,35	– Treibstoffleitung zum Dieselmotor		99 %
• Fixpunkt	m	7,50	– AC Generator		97 %
• Displacement des beladenen Schiffes			– AC-DC Wandler		97 %
nach AB-SBV ad Art. 22	t	147,4	– DC-Motor		97 %
• Deckfläche	m ²	390,3	– Getriebe auf Propellerwelle		95 %
• Fahrgastzahl	-	300	– Brennstoffzelle, System		50 %
• Anzahl Antriebe	-	2	– DC-DC Wandler		97 %
• Motorenleistung	kW	3 x 192	– Elektrolyseur		
• Antriebsleistung	kW	2 x 180	– Verflüssigung Wasserstoff	Anlage ca. 50t/d	82 %
• Geschwindigkeit	km/h	28,0		Anlage ca. 3...5t/d	70 %
• Nutzinhalt Dieseltank	l	5'500	– Aufwärmen; Verdampfen und Strömungsverluste		98 %
Antriebskonzept als Serieller Hybrid, ohne Batterien für Energie-Zwischenspeicherung			• Batterie:		
• Leistungsdaten:			– Laden		90 %
– Bordnetz	gemittelt dauernd	ca. 12 kW	– Entladen		94 %
	Spitzen	bis 22 kW	– DoD (Depth of Discharge)	je nach Typ	60 % / 80 %
– Antriebsleistung Generator:	gemittelt dauernd	ca. 90 kW	• Pfade:		
	Spitzen	bis 275 kW	– Dieseltank – Treibstoffleitung – Dieselmotor – AC Generator –		
– Antriebsleistung Propeller Schaft:	gemittelt dauernd	ca. 85 kW	AC-DC Wandler		21,0 %
	Spitzen	bis 255 kW	– AC Generator – AC-DC Wandler		88,3 %
– Motorische Leistung Diesel total		576 kW	– Brennstoffzelle – DC-DC Wandler		48,5 %
– Elektrische Antriebsleistung		360 kW			
– Generator					
– Dieseltank, gespeicherte Energie total		54'324 kWh	• Leistungsdaten effektive - E-Mail shiptec L. Schreuer 23. Jan. 2019:		
(D=830 kg/m ³ , Heizwert H_i = 11.9 kWh/kg)			– Leistungsabgabe AC-Generator, typischer Arbeitstag		732 kWh
• Netto Energie am E-Motor aus vollem Dieseltank		11'400 kWh	– Energie zu speichern in Wasserstoff		1'389 kWh
Pfad: Dieseltank – Treibstoffleitung – Dieselmotor – AC Generator – AC-DC Wandler			=> Masse Wasserstoff mit LHV		46 kg
• Energie zu speichern in Wasserstoff		24'782 kWh	– Intervall Betankung:	4 Tage mit 10 % Reserve	202 kg
Pfad: Brennstoffzelle – DC-DC Wandler				7 Tage mit 10 % Reserve	506 kg
=> Masse Wasserstoff mit LHV		744 kg			



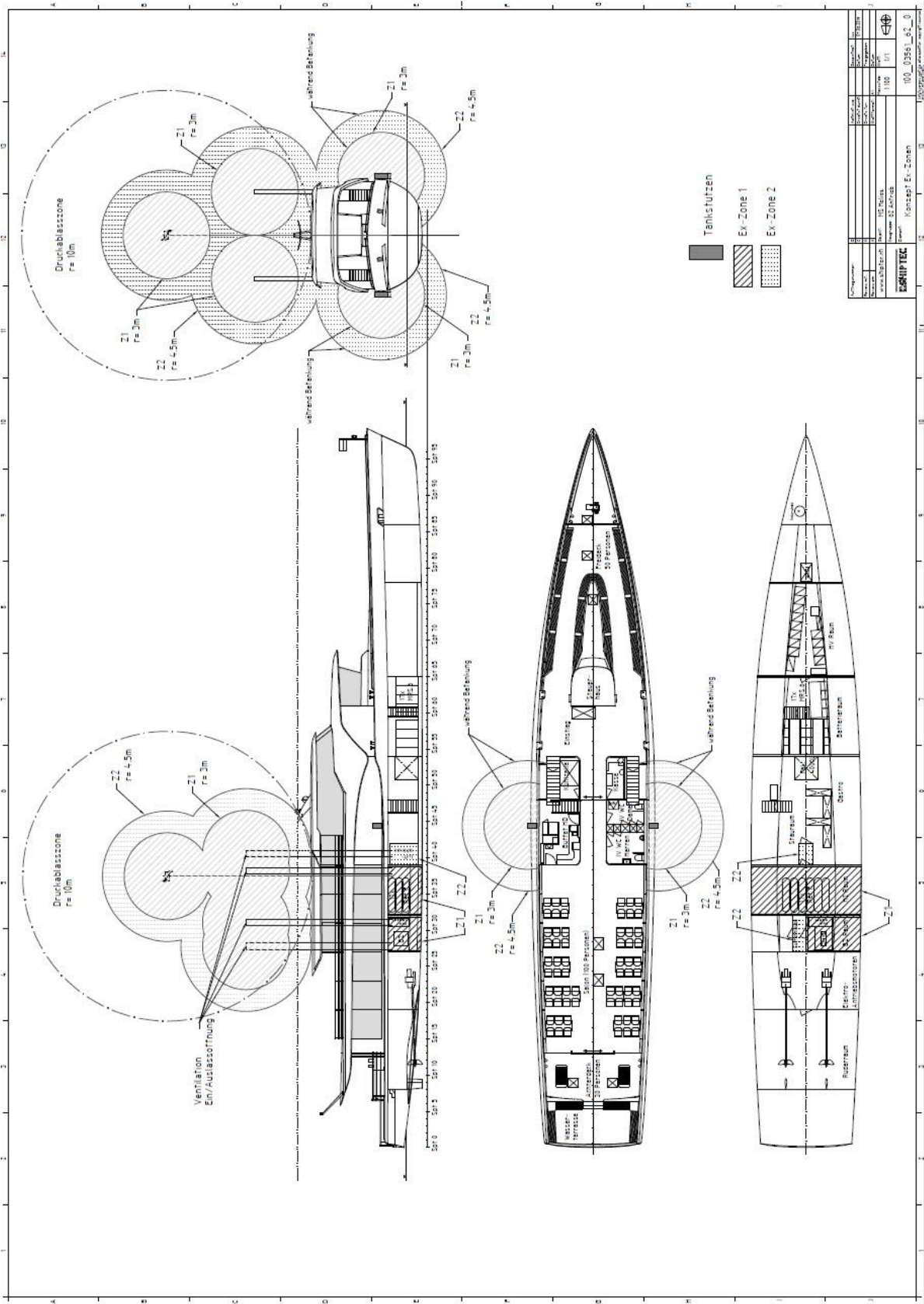


10.6 Anhang 6: Brandschutzkonzept





10.7 Anhang 7: Ex-Zonenplan





10.8 Anhang 8: Stabilitätsabschätzung



Berechnung der

Intakt- und Leckstabilität

MS Helios

Berechnungs-Nr.: 100_03619_14

Index 0

28. Oktober 2019

Verfasser

Name: Müller David
Firma: Shiptec AG
Adresse: Werftrasse 5, CH-6005 Luzern
Telefon (direkt): +41 (0)41 367 67 00
Fax: +41 (0)41 367 68 50
E-Mail: d.mueller@shiptec.ch



gedruckt auf Recyclingpapier

Shiptec AG | Werftrasse 5 | Postfach | CH-6002 Luzern
Telefon +41 (0)41 367 66 99 | Fax +41 (0)41 367 68 50 | info@shiptec.ch | www.shiptec.ch

Ein Unternehmen der SGV Gruppe



Inhalt

1	Aufgabenstellung	3
2	Berechnungen zur Intaktstabilität	3
3	Berechnungen zur Leckstabilität	5
4	Zusammenfassung	5
5	Anhang	6



1 Aufgabenstellung

Das Projekt Helios wurde auf Initiative von Shiptec in Zusammenarbeit mit der Firma Inerso lanciert, um den Einsatz von Wasserstoff in der Schweizer Binnenschifffahrt zu analysieren. Mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie (BFE) und der Schifffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee (SGV) gilt es die Frage zu klären, ob ein Fahrgastschiffes mittlerer Grösse ökonomisch und ökologisch sinnvoll betrieben werden kann.

Im Folgenden wird die Stabilität des Schiffes gemäss der Verordnung vom 14. März 1994 über den Bau und Betrieb von Schiffen und Anlagen öffentlicher Schifffahrtsunternehmen (Schiffbauverordnung SBV, SR 747.201.7) und der Ausführungsbestimmung des UVEK vom 11. Dezember 2015 zur Schiffbauverordnung (AB-SBV, SR 747.201.71) untersucht werden.

2 Berechnungen zur Intakstabilität

Basierend auf dem Berechnungsladefall nach Abbildung 1 ergeben sich die krängenden Momente:

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m³	Total Volume m³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m
1	Gewicht MS Saphir	1	110.000	110.000			22.000	0.000	2.500	0.000
2	Windgewicht	-1	0.000	-0.000			20.000	-0.100	1.340	0.000
3	Mehrgewicht	1	10.000	10.000			24.510	0.100	1.900	0.000
4	Ballast	1	2.000	2.000			42.500	0.000	0.000	0.000
5										
6	Fahrgäste HD	100	0.075	13.500			20.000	0.000	3.150	0.000
7	Fahrgäste GD	120	0.075	9.000			17.000	0.000	5.700	0.000
8										
9	Schwarz wasser	50%	4.014	2.007	4.014	2.007	20.200	0.000	0.000	0.000
10										
11	Total Loadcase			148.607	4.014	2.007	22.010	0.000	2.535	0.000
12	FS correction								0.000	
13	VCG fluid								2.535	

Abbildung 2-1: Berechnungsladefall

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Wert
Krängendes Moment aus seitlicher Personenverschiebung	M_{CHILL}	[kN-m]	231.8
Krängendes Moment aus seitlichem Winddruck	M_{CWIND}	[kN-m]	152.5
Krängendes Moment aus Zentrifugalkraft beim Ruderlegen	M_{CDREL}	[kN-m]	151.3
Krängendes Moment aus den beiden grössten Momenten	M_K	[kN-m]	384.3

Tabelle 2-1: Krängende Momente



Für den Nachweis der Intakstabilität sind das krängende Moment aus der seitlichen Personenverschiebung M_{KPass} , sowie das krängende Moment aus den beiden grössten krängenden Momenten M_K entscheidend. Es ergeben sich für beide Momente die folgenden Krängungswinkel ϕ und Restfreibord f :

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Wert
Krängendes Moment aus seitlicher Personenverschiebung	M_{KPass}	[kN-m]	231.8
daraus resultierender Krängungswinkel	ϕ_{KPass}	[°]	6.7
daraus resultierender Restfreibord	$f_{KPass,Rest}$	[mm]	496
zulässiger Restfreibord	f_{Rest}	[mm]	200
zulässiger Krängungswinkel	$\phi_{KPass,zu}$	[°]	10.0
Krängendes Moment aus den beiden grössten Momenten	M_K	[kN-m]	384.3
daraus resultierender Krängungswinkel	ϕ_K	[°]	10.5
daraus resultierender Restfreibord	$f_{K,Rest}$	[mm]	309
zulässiger Restfreibord	f_{Rest}	[mm]	200
zulässiger Krängungswinkel	$\phi_{K,zu}$	[°]	12.0

Tabelle 2-2: Daten der Intakstabilität

Die gesetzlichen Forderungen werden für die Intakstabilität eingehalten.



3 Berechnungen zur Leckstabilität

Basierend auf dem Berechnungsladefall ergeben sich folgende Werte in den Leckfällen:

Leckfall	Restfreibord f_{Rest} [mm]	geforderter Restfreibord f_{Rest} [mm]	Aufrichtendes Moment M_A [kN-m]	Krängendes Moment M_K [kN-m]
1 (Achterpiek und Raum 2)	446	100	115.6	57.7
2 (Raum 2 und Antriebsraum)	234		120.1	
3 (Antrieb, H2- und BZ-Raum)	191		132.8	
4 (H2-, BZ- und Stauraum)	243		115.9	
5 (Stauraum und Batterieraum)	667		107.7	
6 (Batterieraum und HV-Raum)	630		122.0	
7 (HV-Raum und Leerzelle)	813		132.6	
8 (Leierzelle und Vorpiek)	925		141.3	

Tabelle 3-1: Daten der Leckstabilität

Die gesetzlichen Forderungen gemäss SBV und AB-SBV werden erfüllt.

4 Zusammenfassung

Die Berechnung der Intakt- und Leckstabilität wurden gemäss den Forderungen nach SBV und AB-SBV durchgeführt.

Aus den o.a. Berechnungen ist ersichtlich, dass alle gesetzlichen Forderungen erfüllt werden und das Schiff über eine hinreichende Intakt- und Leckstabilität verfügt. Es kann für 300 Personen zugelassen werden.

Die Anlagen zur Berechnung ergänzen den Bericht.

Luzern, 28. Oktober 2019

Dipl. Ing. Matthias Lemmerhirt
Schiffbauingenieur

Dipl. Ing. David Müller
Schiffbauingenieur