



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

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

# 050 Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff

## Monitoring und Ergänzung zum Zwischenbericht 2b

### Schlussbericht

**Martin Einsiedler, Shiptec AG**

Werftstrasse 5, 6002 Luzern, [m.einsiedler@shiptec.ch](mailto:m.einsiedler@shiptec.ch), [www.shiptec.ch](http://www.shiptec.ch)

**Franz Sidler, Hochschule Luzern**

Technikumstrasse 21, 6048 Horw, [franz.sidler@hslu.ch](mailto:franz.sidler@hslu.ch), [www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

## **Impressum**

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

Programmleiter  
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 050  
Bezugsquelle  
Kostenlos zu beziehen über das Internet  
[www.bav.admin.ch/energie2050](http://www.bav.admin.ch/energie2050)

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

Bern, den [30.09.2021]

## Inhalt

Executive Summary in Deutsch .....	2
Executive Summary en français.....	2
Executive Summary in English.....	2
Zusammenfassung in Deutsch.....	4
Ergebnisse (Energiesparung) und interpretation .....	6
Vergleich mit der Planung.....	8
Wirtschaftliche Betrachtung .....	8
Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	9
Résumé en français .....	11
Résultats (économie d'énergie) et interprétations .....	13
Comparaison avec la planification .....	15
Considération économique .....	15
Conclusions et recommandations.....	16
1. Ausgangslage.....	18
2. Ziel der Arbeit .....	18
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand .....	18
3.1 Systemerfassung .....	20
4. Ergebnisse und Diskussion .....	24
4.1 Treibstoffverbrauch.....	26
4.2 Energiebedarf .....	32
4.3 Energie HLK .....	33
4.4 Vergleich mit der Planung .....	35
4.5 Wartung und Komponentenstandzeiten .....	37
4.6 Wirtschaftliche Betrachtung.....	38
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	40
5.1 Wissenstransfer .....	42
6. Literaturverzeichnis .....	43
7. Anhang .....	44

## Executive Summary in Deutsch

Bei Neuentwicklungen oder grösseren Umbauten von Binnenschiffen wird dem Energieverbrauch des Antriebs und der Bordsysteme immer grössere Aufmerksamkeit geschenkt. Bei konventionellen Schiffen muss die Leistung jedes Antriebsmotors oder Generators auf die maximal mögliche Spitzenleistung ausgelegt werden. Dadurch sind die Wirkungsgrade der meist verwendeten Dieselmotoren im Kursbetrieb, mit sehr vielen transienten Vorgängen, nicht optimal sind.

Das in den Zwischenberichten 1 bis 2b [1] [2] [3] zu diesem Projekt [4] ausführlich beschriebene, hybride Energie- und Antriebssystem ermöglicht es bedeutend kleinere Komponenten in Kombination mit einem Energiespeicher (zum Brechen der trotzdem vorhandenen Spitzenlasten) zu verwenden. Durch die Eigenheiten dieser Systemarchitektur, welche auf die Vernetzung aller möglichen Erzeuger und Verbraucher setzt, steigt die Effizienz aller wichtigen und jeweils optimierten Komponenten signifikant (Peak-Shaving-Konzept). Dadurch können sowohl Betriebs- wie auch Wartungskosten und die damit verbundenen Abgas- und CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich gesenkt werden.

Dieser finale, sich v.a. auf eine längerfristige Messkampagne konzentrierenden Schlussbericht zeigt Treibstoffeinsparungen gegenüber Vergleichsschiffen, auf der gleichen oder ähnlichen Fahrstrecke von ca. 20-25%. Zu diesen Kosteneinsparungen können Einsparungen der Wartungskosten addiert werden. Wegen der hohen Relevanz der sich an Bord befindlichen Komforteinrichtungen (HLK und Eventküche), wird das entsprechende Verhalten dieser Systeme besonders beleuchtet. Dabei kann festgestellt werden, dass in Bezug auf das HLK-System, bzw. dessen Regelung bedeutendes Optimierungspotential vorhanden ist (Bsp. Aufheiz-, Abkühlprozesse sowie Luftwechsel). Diese Optimierungen und die dank grosser Parametervariabilität vorhandenen Möglichkeiten beim hybriden Energie- und Antriebssystem des MS Diamant (Pilotschiff), lassen weitere Verbesserungen im zukünftigen Betrieb erhoffen (siehe dazu die Ausführungen unter 5).

## Executive Summary en français

Dans le cas de nouveaux développements ou de transformation/rénovation importantes de bateaux de navigation intérieure, une attention croissante est accordée à la consommation d'énergie des systèmes de propulsion et de bord. Sur les navires conventionnels, la puissance de chaque moteur de propulsion ou générateur doit être conçue pour la puissance de crête maximale possible, ce qui signifie que le rendement des moteurs diesel les plus couramment utilisés n'est pas optimal lorsqu'ils fonctionnent sur le cours, avec de très nombreux processus transitoires.

Le système hybride d'énergie et de propulsion décrit en détail dans les rapports intermédiaires 1 à 2b [1] [2] [3] pour ce projet [4] permet l'utilisation de composants plus petits en combinaison avec un système de stockage d'énergie (pour briser les charges de pointe qui sont néanmoins présentes). En raison des caractéristiques de cette architecture de système, qui repose sur la mise en réseau de tous les générateurs et consommateurs possibles, l'efficacité de tous les composants importants et respectivement optimisés augmente considérablement (concept d'écrtage des pointes). Ainsi, les coûts d'exploitation et d'entretien, ainsi que les émissions de gaz d'échappement et de CO<sub>2</sub> qui y sont liées, peuvent être réduits de manière significative.

Ce rapport final, qui se concentre principalement sur une campagne de mesure à plus long terme, montre des économies de carburant d'environ 20 à 25 % par rapport à des navires comparables sur les mêmes routes ou des routes similaires. A ces économies de coûts peuvent s'ajouter des économies sur les coûts de maintenance.

En raison de la grande importance des équipements de confort à bord (CVC et cuisine événementielle), le comportement correspondant de ces systèmes est particulièrement mis en évidence. On peut constater qu'il existe un potentiel d'optimisation important en ce qui concerne le système CVC et sa régulation (p. ex. processus de chauffage et de refroidissement et échange d'air). Ces optimisations et les possibilités offertes par le système hybride d'énergie et de propulsion du MS Diamant (projet pilote) grâce à la grande variabilité des paramètres, font espérer de nouvelles améliorations dans l'exploitation future (voir les commentaires sous 5).

## Executive Summary in English

When inland vessels are either overhauled or designed from scratch, the close evaluation and specific optimization of their energy consumption from onboard systems as well as propulsion is increasingly

important. On conventional ships, the rated power of every propulsion engine or generator must correspond to required peak power. For vessels that operate intensive, timetabled services and are only equipped with conventional diesel engine, this creates a degree of energy inefficiency due to suboptimal transient processes.

The hybrid energy and propulsion system described in detail in the interim reports 1 to 2b [1] [2] [3] for this project [4] allows the use of significantly smaller components in combination with an energy storage system. This makes it possible to break peak demand and more evenly distribute energy use/production. The system architecture is designed to maximize the energy efficiency of all components and improve the full integration of power producers and consumers. This enables a reduction of operation costs and maintenance expenses, while significantly lowering CO<sub>2</sub> emissions.

This final report, which focuses mainly on a longer-term measurement campaign, shows fuel savings of approx. 20-25% compared to comparable ships on the same or similar operation. Savings in maintenance costs can be added to these cost savings.

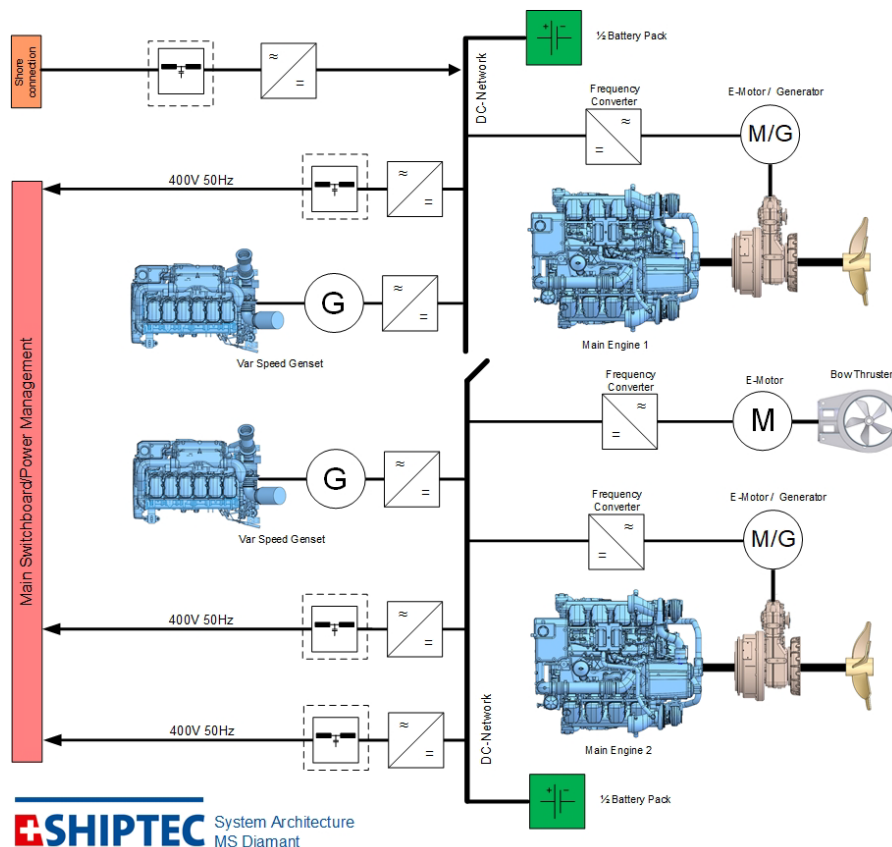
Due to the high relevance of the comfort equipment on board (HVAC and event kitchen), the corresponding behavior of these systems is particularly highlighted. It can be determined that there is a significant potential for optimization with regard to the HVAC system and its controller (e.g. heating and cooling processes as well linked air exchange). These optimizations and thanks to the great parameter variability in the hybrid energy and propulsion system of the MS Diamant (pilot ship), gives all possibilities for further improvements in future operation (see the comments under 5).

## Zusammenfassung in Deutsch

Wie bereits in den Zwischenberichten 2b vom 30. Juni 2017 [1] sowie den vorangegangenen Zwischenberichten von 2016 [3] [2] erörtert wurde, wird in diesem Projekt die Integration, respektive Auslegung eines alternativen, hybriden Energie- und Antriebssystems für ein definiertes Pilotschiff behandelt. Dies mit dem Ziel eine ökologisch, wie auch ökonomisch interessante Alternative zu den heute üblichen konventionellen, reinen Dieselantrieben zu entwickeln. Der im Projekt behandelten Auslegung, respektive dem neuen Systemdesign liegen die Anforderungen an ein (neues) Pilotschiff (MS Diamant) für die Schifffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees zu Grunde. Diese umfassen insbesondere die Ansprüche an den Passagierkomfort (Geräusche, Vibrationen, Klimatisierung, Bordrestaurant, usw.) sowie die Anforderung des Kunden, ein möglichst energieeffizientes Schiff zu planen und zu bauen. Ebenfalls und sehr explizit sind die zu fahrenden Kurse (Geschwindigkeiten und Passagierauslastungen) bei den verschiedenen Fahrplaneinsätzen berücksichtigt worden. D.h. die exakte Kenntnis des (zukünftigen) Einsatzes des Schiffes wurden stark bei der Systemauslegung berücksichtigt. Siehe dazu die Angaben zum Fahrprofil und dessen Auswertungen in [5]. Dasselbe gilt für die Betrachtung der entsprechenden System(zusatz)kosten für die Integration und den Bau. Diese müssen in jeden Fall in einem vernünftigen Rahmen amortisierbar sein. Im Grossen und Ganzen können die entsprechenden Projektziele des Projekt 050 Hybrides Antriebssysteme für ein Fahrgastschiff wie folgt zusammengefasst werden:

- Signifikante Treibstoffeinsparungen im täglichen Betrieb (Ausgangslage min. – 12-16% verglichen mit einem konventionellen Schiff).
- Zeitgleiche Optimierung der Betriebskosten in Bezug auf Wartung und Wiederbeschaffung.
- Erhaltung oder Erhöhung der geforderten Betriebssicherheit, respektive Redundanzen im Betrieb.
- Einhaltung der Kundenvorgaben in Bezug auf Komfort (Passagierkomfort) im Speziellen bei Klimatisierung und die Laufruhe (Geräusch und Vibrationen)

Um diesen Zielen gerecht zu werden, wurden im Rahmen des Projektes die Basisideen für diverse alternative und hybride Energie- und Antriebssysteme analysiert und untersucht. Dies mit dem Fokus, ein signifikantes Potential in Bezug auf Energieeffizienz sowie die zu erwartenden Betriebskosten zu identifizieren. Schlussendlich wurde für das ausgewiesenen Pilotschiff (MS Diamant) ein, den Anforderungen und dem geplanten Fahrprofil entsprechendes, optimales System entwickelt und ausgelegt. Siehe die untenstehende Grundarchitektur und die Auslegungsgrundsätze gem. [5].



Im Rahmen der ausführlichen Untersuchungen während der Designphase wurde zudem festgestellt, dass nicht alleine der Schiffsantrieb, sondern insbesondere die Bordstromerzeugung, wie auch die grössten Bordstromverbraucher (insbesondere für die Komfortansprüche) mit in die Betrachtungen einbezogen werden müssen. Nur so lässt sich ein optimales System auslegen und so steuern, dass die besten Ergebnisse in Bezug auf Energieeffizienz erreicht werden können. Es zeige es sich, dass ein solches System immer als ganze, d.h. systemisch betrachtet werden muss. (vergl. [1] [3] [5]).

Folgende Merkmale zeichnen das gewählte System aus:

Downsizing der Hauptmaschine:

Fahren in den optimalen Betriebspunkten des Verbrennungsmotors, kein Oversizing der Maschine, dank des elektrischen Boosters in dynamischen Vorgängen (Drehmomentumkehr des Wellengenerators, Peak-Shaving), minimierte Beschleunigungsanreicherung sowie günstigere Wartungskosten dank der kleineren Hauptmaschine.

Versorgung des Bordnetz über die Hybridbatterien und den Wellengenerator:

Daher sind die bei konventionellen Anlagen dauernd und in einem sehr schlechten Wirkungsgrad laufenden Bordnetzgeneratoren nur noch in sehr selten in Betrieb (Treibstoffeinsparung und weniger Wartung wegen geringer Laufzeit).

Aktives Powermanagement, inkl. «Heavy consumer management» ([1] [5]) zur optimalen Steuerung der Energiequellen in Kombination mit den grössten (Komfortbedingten-)Verbrauchern.

Neben dem praktischen Umsetzen der Systemideen sind im Rahmen des Projektes divers Werkzeuge zur schnellen, optimalen und risikominimierenden Auslegung von Systemen entwickelt worden. U.a. konkrete Messmethoden um bestehende und zukünftige Fahrprofile aufnehmen zu können, welche in Kombination mit schiffbaulichen Basisuntersuchungen (CFD und Schlepptankversuche) sowie umfassende System-Simulationen eine zuverlässige Prognose der Systemfunktionen, wie auch der entsprechenden CAPEX und/oder OPEX ermöglichen. Diese neuen Werkzeuge und Verfahren konnten im Rahmen des Projektes nicht nur entwickelt, sondern auch ausgiebig validiert werden. Sie bilden die Basis für die Auslegung von inzwischen 7 weiteren Schiffen welche durch die Shiptec seit MS Diamant ausgelegt und um-, respektive neugebaut wurden.

Fortfolgend auf die in den erwähnten Zwischenberichten [1] [2] [3] gemachten Erkenntnissen zum zuverlässigen Betrieb der eingebauten Systeme, sind umfassende Messkampagnen insbesondere in den Jahren 2018 und 2019 durchgeführt worden, welche alle, für die Beurteilung der Systemperformance notwendigen Basisdaten liefern sollen.

Dieser Schlussbericht, bzw. die Dokumentation der auch im Projektbeschrieb [4] erwähnten Messkampagne baut explizit auf den Erkenntnissen auf, welche im Zwischenbericht 2b vom 30. Juni 2017 [1] erörtert wurden. Wie bereits auch in den, dem Zwischenbericht 2b vorangegangenen Zwischenberichten von 2016 [3] [2] erwähnt wurde, sollen in einem letzten Teil des Projektes, die bis dahin gemachten Erkenntnisse durch ausführliche Energie- und Performancemessungen über eine gewisse Zeit, Klarheit über die Wirksamkeit und Funktion des neuen hybriden Energie- und Antriebssystem für Fahrgastschiffe liefern. Mit diesem Bericht sollen diese Erkenntnisse aufgezeigt werden (inkl. allfälliger Darstellung von Optimierungspotential).

Damit diese effektiven Verbrauchsdaten aufgezeigt und mit anderen Schiffen verglichen werden können, werden in diesem letzten Teil des Projektes «Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff» [4] die wesentlichen Energieflüsse im Rahmen einer ausführlichen Messkampagne gemessen. Weiter werden die Ergebnisse mit den Planungswerten sowie Vergleichsschiffen verglichen und mögliche weitere Optimierungsmöglichkeiten zur Reduktion des Gesamt-Energiebedarfs für den Schiffsbetrieb aufgezeigt.

Folgende Zielbereiche sollen mit diesem Bericht verifiziert, bzw. als Schlusspunkt zum Projekt abgehandelt werden:

- a) Potentiale zur Treibstoff- und CO<sub>2</sub>-Reduktion aufgrund neuer Technologien und neuer, vernetzter Energie- und Antriebstechnologien identifizieren und umsetzen, inkl. konkrete Umsetzungsmassnahmen.
- b) Verifizieren und einordnen der getroffenen Massnahmen (nach den erwähnten Messreihen).
- c) Effektive Outcomes aufzeigen: z.B. allg. Ansätze für Auslegungen, spezielle Auslegungswerkzeuge, Simulationstools, usw.

Auf dem Pilotschiff (MS Diamant) wurden alle möglichen Einflussgrößen, sowie auch die Reaktionen des/der System(e) erfasst und aufgezeichnet. Neben den eigentlichen Messdaten zum hybriden Energie- und Antriebssystem betrifft dies v.a. auch die Nebeneinflüsse von HLK- und Gastronomiesystemen.

Dazu wurden das eigentliche, hybride Energie- und Antriebssystem, welches schon über die Informationen bzgl. Hauptenergieflüsse verfügt, mit einem Messlogger ausgerüstet. Zudem wurden sämtliche Betriebszustände des Schiffes über eine Schnittstelle zum Schiffsmanagementsystem (Geschwindigkeiten, Position, Passagierzahlen, Temperaturen, Dieserverbräuche, usw.) in einem separaten Datenlogger aufgenommen. Derselbe Datenlogger hat auch die Daten der Nebensysteme (insbesondere HLK und Gastronomiesystemlasten) aufgezeichnet.

Diese Daten und Aussagen werden einander gegenübergestellt und in einen vergleichbaren Kontext, v.a. bezgl. deren Relevanz in Bezug auf den Treibstoffverbrauch des Schiffes gestellt. Sämtliche Energieinputs, wie auch alle relevanten Verbraucher wurden erfasst, um eine Aussage zum Optimierungspotential und möglichen weiteren Schritten zu evaluieren.

Folgende Hauptresultate können extrahiert werden:

## **ERGEBNISSE (ENERGIEEINSPARUNG) UND INTERPRETATION**

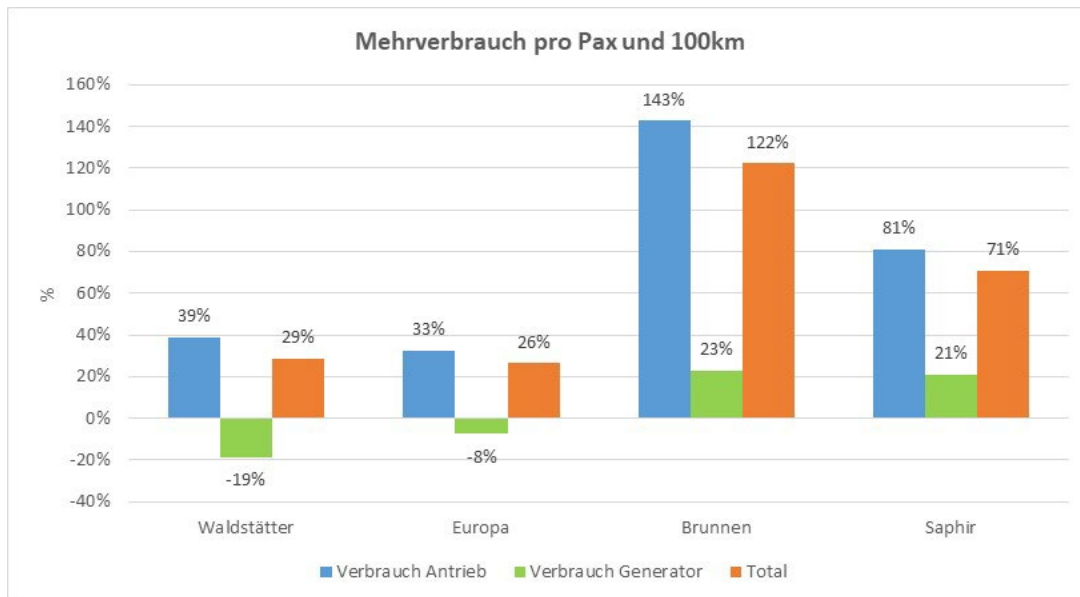
Von März 2019 bis Oktober 2019 wurde 132'158 Liter Diesel verbraucht, wovon 80.8 % für den Antrieb benötigt wurden. Der restliche Dieselbedarf von 19.2 % wurde für die Stromerzeugung und zur Wärmeerzeugung mit dem Heizkessel benötigt.

Davon ausgehend, dass auf Grund eines viel grösseren Passagierkomforts auf MS Diamant (vergl. mit den Standardvergleichsschiffen) auch der Bordstromverbrauch ansteigt (z.B. für Klimaanlage, grössere Bordküche, Audioanlage, Personenlift, usw.) kann für eine Aussage zum Nutzen des Systems, in einem ersten Schritt, ein Vergleich ohne Berücksichtigung des Bordstromverbrauches gemacht werden. Die im international präsentierten, wissenschaftlichen Paper «Hybrid energy- and propulsion system for vessels in timetable operation» [5] diesbezüglich gemachten Aussagen und Berechnungen zeigen, dass in diesem Fall von einer, auf 100 Tonnen Schiffsgewicht bezogenen Einsparung von ca. 25-30% (für den Antrieb) ausgegangen werden kann.

Wird nun im Rahmen der hier beschriebenen Messkampagne dieser Umstand genauer untersucht, können diesbezüglich differenziertere Aussagen gemacht werden:

Wird der Verbrauch für die Stromerzeugung genauer betrachtet fällt auf, dass wie in [5] erwähnt, MS Diamant höhere absolut Verbräuche aufweist als z.B. die Vergleichsschiffe MS Waldstätter und MS Europa welche in etwa dieselben Betriebszeiten und Strecken fahren wie MS Diamant. Wie ebenfalls in [5] erwähnt, lässt sich dieser Mehrverbrauch für die Bordstromerzeugung erklären: Einerseits hat MS Diamant eine sehr grosse, elektrisch betriebene Küche an Bord (die anderen Schiff habe Gas betriebene Küchen an Bord), andererseits ist MS Diamant auch das einzige Schiff mit einer Klimaanlage für den Passagierbereich. Beide Komponenten tragen hauptsächlich zu einem ca. 20% grösseren Energieverbrauch (in erster Linie nicht Treibstoffverbrauch) bei. Der entsprechende Mehr- (minus) und Minder- (plus) Verbrauch der Vergleichsschiffe zu MS Diamant (Pilotschiff) kann dem folgenden Diagramm (Mehrverbrauch zu MS Diamant bezogen auf max. Pax und 100km) entnommen werden:

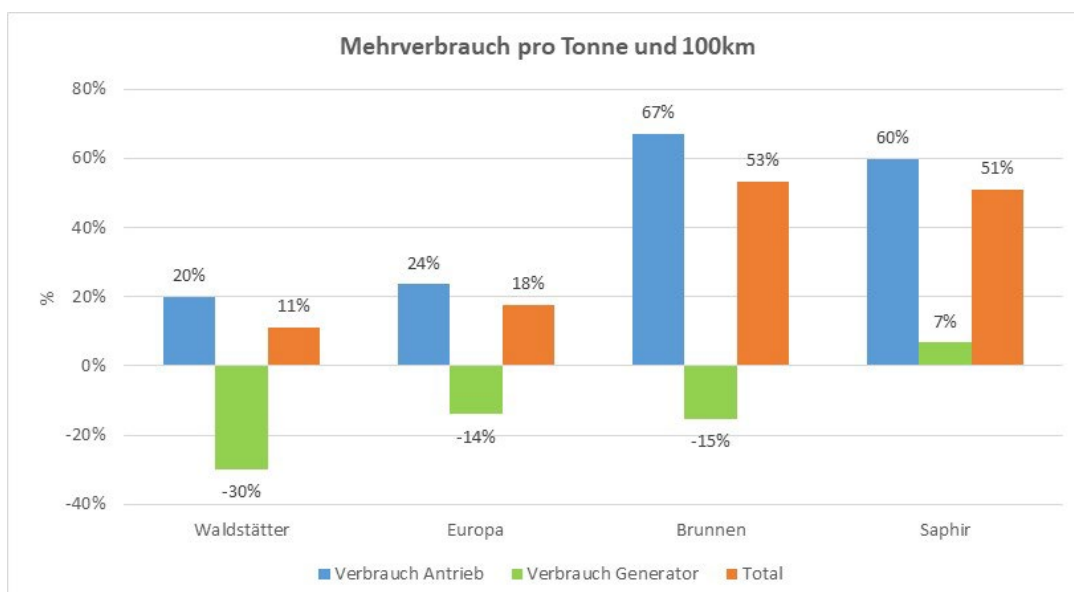




Diesem Diagramm ist zu entnehmen, dass der erwähnte 20% höhere Energiebedarf für das Bordnetz sich mit 19% mehr Treibstoffverbrauch abzeichnet (bezogen auf MS Waldstätter als Best-Case). Wird MS Europa als Massstab genommen, sind es nur noch 8% Mehrverbrauch. Würde bei den Vergleichsschiffen der oben erwähnte 20%-ige Mehrbedarf an Energie für die Komfortanforderungen des MS Diamant eingerechnet, kann gesagt werden, dass sich die im Diagramm ausgewiesenen Mehrverbräuche neutralisieren oder gar in einen Minderverbrauch drehen lassen.

Berücksichtigt man die Tatsache, dass das Bordnetz bei MS Diamant über zwei Wechsel-, bzw. Gleichrichterstufen mit entsprechenden Wirkungsgraden erzeugt werden muss, kann gesagt werden, dass einerseits das Mitführen gespeicherter Energie von der Landstromversorgung (Batterien) und andererseits die effiziente Erzeugung mit Hilfe der Hybridgeneratoren (Wellengeneratoren) in einem sehr guten Dieselmotorenwirkungsgrad die elektrischen Wirkungsgradverluste in den Gleich- und Wechselrichtern kompensieren.

Um eine umfassende Aussage über die grössere Effizienz eines Hybridsystems gegenüber einem konventionellen System machen zu können, darf aber nicht nur der Vergleich pro möglichen/r Pax gemacht werden (was in Bezug auf den Bordstromverbrauch sicherlich richtig ist). Vielmehr muss auch ein Vergleich bezogen auf eine Tonne Schiffgewicht gemacht werden. Dies weil der Schiffswiderstand direkt proportional zu diesem steht und das Gewicht somit den Energiebedarf für den Antrieb direkt beeinflusst. Die entsprechenden Vergleichswerte sind dem folgenden Diagramm zu entnehmen:



Diesem Diagramm kann man die relevanten Werte für die Mehrverbräuche des Antriebs (verglichen mit MS Diamant) entnehmen. Hier fällt auf, dass MS Diamant verglichen mit MS Waldstätter 20% und verglichen mit MS Europa ca. 24% besser abschneidet. Dies aufgrund eines, durch das Hybridsystem möglichen Downsizings der Antriebsdieselmotoren (Betreiben in optimaleren Motorenwirkungsgraden) sowie aufgrund des Peak-Shavings bei dynamischen Vorgängen.

Um nun effektiv eine Aussage über die Effizienz des Systems über alles machen zu können, muss eine Kombination aus beiden Vergleichen angenommen werden. Einerseits der Vergleich bezogen auf max. Pax, andererseits bezogen auf das Schiffsgewicht. Wichtig erscheint aber, dass die im Zwischenbericht 2b [1] und im international präsentierten wissenschaftlichen Paper «Hybrides Energie- und Antriebssystem für Binnenschiffe im Fahrplandienst» [5] gemachten Aussagen zu den vergleichbaren Treibstoff- und somit CO<sub>2</sub>-Einsparungen bestätigt werden können. Zusammengefasst betrachtet, können somit ca. 20-30% Einsparung (je nach Betrachtungsweise) nachgewiesen werden. Insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass konventionelle/traditionelle Schiffe bei gleichen Komfortanforderungen wie MS Diamant ca. 20% mehr Energieverbrauch hätten. Durchschnittlich (über alle möglichen Auslastungen und Kursfahrten) kann somit über alles, ein Wert von ca. 23.6% angegeben werden.

Neben den eigentlichen Messungen in Bezug auf das Hybridsystem, wurden auch im Zusammenhang mit dem vorgängig zum Bau des MS Diamant gemachten KTI Projekt «Energieeffizientes Fahrgastschiff» [6] aufwändige Messungen zu den Komfortsystemen des MS Diamant gemacht. Dabei zeigte sich insbesondere, dass Regelung und Steuerung des HLK Systems durchaus Optimierungspotential beinhaltet. So konnte erkannt werden, dass wegen fehlerhafter Einstellungen (oder fehlerhafter Bedienung durch die Crew) die Aufheizphase des Schiffes schon vor dem eigentlichen Beginn des fahrplanmässigen Kurses zu einem schnellen Entleeren des eingebauten Wärmespeichers (welcher mit Abwärme im laufenden Betrieb beschickt wird) führt. Dies mit der Folge, dass der zusätzlich eingebaute Spitzenlastkessel viel mehr in Betrieb ist als ausgelegt. Auch haben die Messergebnisse gezeigt, dass die Klimatisierung im Sommer viel zu oft mit Hilfe der energieintensiven Kältemaschine arbeitet. Hier sollte öfters die passive Kühlung (Vorkühlung der Luft mit Seewasser) zur Kühlung beitragen. Es kann ebenfalls auch davon ausgegangen werden, dass eine Anpassung der Regelparameter Abhilfe schaffen kann.

## **VERGLEICH MIT DER PLANUNG**

Verglichen mit der Planung kann heute gesagt werden, dass das hybride Energie- und Antriebssystem die vorausgesagten Einsparungen, bzw. das prognostizierte Verhalten der Systeme eingehalten, bzw. übertroffen wurde. So kann als Vergleich eine Prognose des DNVGL [7] herangezogen werden, welche von einem Minderverbrauch von ca. 13.5%, verglichen zu einem vergleichbaren Schiff, ausweist. Hier konnten die Werte übertroffen und zugleich aufgezeigt werden, dass das System zuverlässig, mit hoher Verfügbarkeit und mehrfach redundant arbeitet [8]. Bei den Komfortsystemen ist dies (noch) nicht der Fall. Insbesondere die Nutzungszeiten des Spitzenlastkessels, wie auch der Einsatz der Kältemaschine lassen Optimierungspotential offen.

Neben den effektiven Vergleichszahlen konnten im Laufe des Projektes Vergleiche zwischen dem im Projekt entwickelten Simulationstool und realen Messwerten gemacht werden. Diese Vergleiche zeigen eine generelle Abweichung von ca.  $\pm 2-3\%$  zwischen Simulation und Realität. Diese Werte konnten inzwischen mehrfach bei Vergleichsprojekten verifiziert werden. Die oben angesprochenen, im Rahmen des Projektes entwickelten Messverfahren, Auslegungsmethoden und Simulationstools konnten zwischenzeitlich konstant optimiert werden und haben in diversen anderen Projekten für diverse Schifffahrtsgesellschaften in der Schweiz Anwendung gefunden.

## **WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG**

Eine bis dahin gemachte, abschliessende, wirtschaftliche Betrachtung zeigt, dass die vorgängig prognostizierten Amortisationszeiten für die Mehrkosten des Systems, verglichen mit konventionellen Anlagen, in etwa bestätigt werden können. Sie liegen bei ca. 6.5 Jahren, was etwa der Hälfte der zu erwartenden Lebensdauer der Hauptantriebsanlage entspricht. Weiterführende Erkenntnisse, v.a. basierend auf den, seit MS Diamant realisierten, weiteren Projekte haben zudem gezeigt, dass diese Zeiten stark vom effektiven Einsatz eines ausgerüsteten Schiffes abhängen. D.h. je nachdem wie das Schiff betrieben wird (hybrider, kombinierter Betrieb, wie MS Diamant oder hybrider Betrieb mit reinem E-Antrieb wie MS Bürgenstock), sowie je nachdem wie viele Einsatzstunden das Schiff pro Jahr leistet, können diese Amortisationszeiten massiv verkürzt werden (Bsp. MS Bürgenstock ca. auf 3.2Jahre).

Unter diesem Gesichtspunkt kann gesagt werden, dass sich hybride Systeme lohnen. Zudem kann auch gesagt werden, dass das diesbezügliche (wirtschaftliche) Potential für eklektische Antriebe vielversprechend ist.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Neben der Bestätigung der ersten Berechnungen in Bezug auf die Energieeinsparpotentiale und der Bestätigung der Wirksamkeit der angewandten Methoden und im Rahmen des Projektes entwickelten Tools, zeigen die nun aus der abschliessend durchgeführten Messkampagne vorliegenden Ergebnisse weiter vorhandenes Optimierungspotential auf. Dieses soll in der nächsten Zeit (Zeithorizont bis Ende 2020-2021) ausgeschöpft werden. Dank der grossen Parametervariabilität der Systeme (Haupt- und Subsysteme) lassen sich ohne grosse Änderungen an der Hardware weitere Optimierungsloops umsetzen. Insbesondere betrifft dies:

- Die Optimierung des effektiven Peakshaving-Konzepts, d.h. v.a. den Einsatz des Boosters sowie des Wellengenerators an den beiden Hauptantriebsmaschinen.
- Die Optimierung des Batteriemanagementsystems, kombiniert mit weiterer Schulung der Crew.
- Die automatische Erfassung und Auswertung von dynamischen und nicht dynamischen Betriebszuständen, sowie deren Zuhilfenahme für zukünftige selbstlernende Anteile bei einer Überarbeitung der Regelungssoftware.

Neben den eigentlichen Optimierungen im Bereich des hybriden Energie- und Antriebssystems haben die nun vorliegenden Messdaten aufgezeigt, dass im Bereich Komfort-Elektrik und HLK diverse Optimierungsarbeiten notwendig sind. Dies betrifft insbesondere die folgenden Bereiche:

- Die Regelung der Heizung, bzw. v.a. des Aufheizens des Schiffes am Morgen vor dem eigentlichen Betrieb.
- Die aktive, bzw. passive Kühlung. Hier haben die Messdaten gezeigt, dass gegenüber der Prognose zu viel Energie in die aktive Kühlung (durch Kältemaschine) fliesst.

Neben dem Betrieb des Pilotschiffes MS Diamant sind die grössten Outcomes aus dem Projekt 050 «Hybrides Energie- und Antriebssystem für ein Fahrgastschiff», die nun vorliegenden Erfahrungen bei der Auslegung solch komplexer Systeme. Hierbei kann und muss sicherlich die vorgängige Simulation der Systeme erwähnt werden. Nur dank dieser zuverlässigen Methode, welche im Normalfall immer auf real gemessenen Daten von gleichen oder ähnlichen Schiffen sowie gleichen oder ähnlichen Betriebsarten basiert, lässt sich ein Downsizing der relevanten Komponenten bei geringem Auslegungsrisiko bewerkstelligen. Erst damit lässt sich das bei MS Diamant erzielte Potential ausschöpfen. Das betrifft insbesondere den Bereich in dem Leistungselektronikwirkungsgrade mit in die Auslegung hineinspielen. Hier entscheiden die genauen Vorkenntnisse des Einsatzes und des Verhaltens des Schiffes/Systeme über Erfolg oder Misserfolg eines Projektes.

Die oben erwähnten Punkte bzgl. den exakten Kenntnissen über den (zukünftigen) Betrieb, wie auch die Simulationsmethodik wurden seit dem Projekt auf MS Diamant (2017), bereits an 7 weiteren Schiffen angewandt, respektive in Um- oder Neubauprojekten umgesetzt (MS Waldstätter, MS Bürgenstock, Navixpress, MS Berna, MS Jungfrau, MS Rudolf, MS Traun). Die erzielten Ergebnisse in der Realität zeigen die Wirksamkeit der entwickelten Werkzeuge. Fünfzehn weitere Schiffe (Schweizerische und Europäische) wurden zudem bereits prognostiziert und warten auf die entsprechende Projektumsetzung, respektive Budgetfreigabe für einen Um- oder Neubau. Bei allen Auslegungen oder Prognosen wurden auch alle Systeme inkl. der im MS Diamant umgesetzten Philosophie des Powermanagements sowie des Heavy-Consumer-Request, bzw. – Shut-off [1] berücksichtigt und z.T. (wo sinnvoll) umgesetzt. Dies zeigt einerseits die Tauglichkeit der erarbeiteten Werkzeuge, wie auch den Erfolg der entsprechenden Konzepte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Projekt 050 einen enormen Schub im Schweizer (und internationalen) Binnenschiffmarkt in Richtung energieeffiziente und emissionsarme Systeme ausgelöst hat. Dies zeigt sich nicht nur an den Anfragen in Bezug auf Um- und Neubauten (mit diesen neuen Systemen oder deren Evolution), sondern auch am regen Interesse der Schweizer Schifffahrtsgesellschaften an Detailanalysen von bestehenden Anlagen. Immer auf Basis der im Projekt erarbeiteten Tools und Methoden sowie daraus folgenden Simulationen. Dies, um entsprechende Potentiale zu eruieren.

Auch haben die aus dem Projekt hervor gegangenen wissenschaftlichen Papers und Vorträge in der Branche international Aufsehen erregt. Hierbei können die Publikationen [5] im Jahrbuch 2018 der Schiffbautechnischen Gesellschaft oder auch die Vorträge und Publikationen im Rahmen internationaler Konferenzen erwähnt werden (RINA @ Europort 2017, CIMAC Kongress 2019 in Vancouver, Electric and Hybrid Marine Technology World Congress 2018 in Amsterdam, 19. NAV Kongress in Triest, usw.).

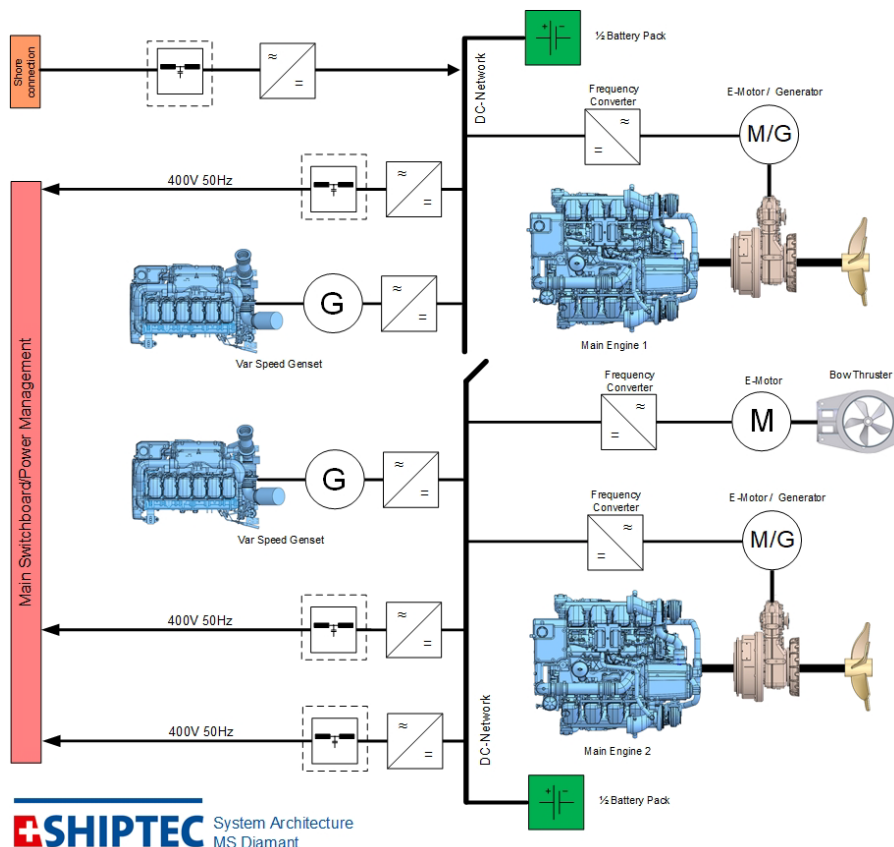
Als Folge davon ist das Projektteam bei der Shiptec AG im Begriff die nächsten Schritte in Richtung Zero-Emission-Ship anzugehen. Insbesondere für den harten Einsatz im öffentlichen Verkehr, bzw. Fahrplanverkehr (ähnlich MS Diamant) geht das Projektteam bereits einen (über-) nächsten Schritt weiter. Wegen der kleinen Energiedichte von Batterien und den kleinen elektrischen Anschlussleistungen an den Landungsstegen, im Verhältnis zum Energiebedarf im Fahrplandienst, ist ein rein elektrischer Betrieb nur begrenzt umzusetzen. Vielmehr muss mit einem Range-Extender gearbeitet werden. Hier bietet sich insbesondere eine Lösung auf Basis eines Wasserstoff-Brennstoffzellen Range-Extender an. Im Gegensatz zur Seeschifffahrt bieten sich hier in der Schweiz besondere Umstände um nachhaltig produzierten Wasserstoff in Binnenschiffen effizient und relativ kostengünstig, bei vertretbaren Risiken und Platzbedarf einzusetzen. Siehe dazu den im Herbst 2019 erstellten Bericht zum BfE geförderten Projekt Helios [9].

## Résumé en français

Comme déjà discuté dans les rapports intermédiaires 2b du 30 juin 2017 [1] et les rapports intermédiaires antérieurs de 2016 [3] [2], ce projet porte sur l'intégration et la conception d'un système d'énergie et de propulsion hybride alternatif pour un navire pilote défini. L'objectif est de développer une alternative écologiquement et économiquement intéressante aux systèmes de propulsion classiques au diesel pur utilisés aujourd'hui. La disposition et la conception du nouveau système dont il est question dans le projet sont basées sur les besoins d'un (nouveau) navire pilote (MS Diamant) pour la compagnie de navigation du lac des Quatre-Cantons. Il s'agit en particulier des exigences de confort des passagers (bruit, vibrations, climatisation, restaurant à bord, etc.) ainsi que de l'exigence du client de planifier et de construire un navire aussi économe en énergie. De même, et de manière très explicite, les cours à suivre (vitesses et charges de passagers) ont été pris en compte dans les différentes applications d'horaires. Cela signifie que la connaissance exacte de l'utilisation (future) du navire a été fortement prise en compte dans la conception du système. Voir les informations sur le profil de charge et ses évaluations dans [5]. Il en va de même pour la prise en compte des coûts (supplémentaires) du système correspondant pour l'intégration et la construction. Ceux-ci doivent en tout cas être amortissables dans une fourchette raisonnable. En général, les objectifs correspondants du projet 050 "Systèmes de propulsion hybrides pour navires à passagers" peuvent être résumés comme suit :

- Économies de carburant significatives en exploitation quotidienne (position de départ min. - 12-16% par rapport à un navire conventionnel).
- Optimisation simultanée des coûts d'exploitation en termes de maintenance et de réapprovisionnement.
- Maintien ou augmentation de la sécurité opérationnelle requise, respectivement des redondances dans l'exploitation.
- Respect des spécifications du client en termes de confort (confort des passagers), notamment la climatisation et le silence (bruit et vibrations)

Afin d'atteindre ces objectifs, le projet a analysé et étudié les idées de base de divers systèmes d'énergie et d'entraînement alternatifs et hybrides. L'accent a été mis sur l'identification d'un potentiel important en termes d'efficacité énergétique et de coûts d'exploitation prévus. Enfin, un système optimal a été développé et conçu pour le navire pilote (MS Diamant) en fonction des besoins et du profil de navigation prévu. Voir l'architecture de base ci-dessous et les principes de conception selon [5].



Au cours des enquêtes détaillées menées pendant la phase de conception, il a également été déterminé que non seulement la propulsion du navire, mais aussi la production d'énergie à bord, ainsi que les plus gros consommateurs d'énergie à bord (notamment pour les exigences de confort) doivent être pris en compte. C'est la seule façon de concevoir un système optimal et de le contrôler de telle sorte que les meilleurs résultats en termes d'efficacité énergétique puissent être obtenus. Il est évident qu'un tel système doit toujours être considéré comme un tout, c'est-à-dire de façon systémique. (Cf. [1] [3] [5]).

Les caractéristiques suivantes distinguent le système sélectionné :

Réduction de la puissance du moteur principal (downsizing) :

Opérer aux points de fonctionnement optimum du moteur à combustion, pas de surdimensionnement du moteur grâce au booster électrique dans les processus dynamiques (inversion du couple du houlomotrice, Peak-Shaving), minimiser enrichissement de l'accélération et coûts de maintenance réduits grâce au moteur principal plus petit.

L'alimentation électrique de bord est assurée par les batteries hybrides et l'houlomotrice :

Cela signifie que les générateurs de bord, qui dans les systèmes conventionnels opéré en continu et avec un très faible rendement, ne sont que rarement en service (économies de carburant et moins de maintenance grâce à une durée d'opération plus courte).

Gestion active de l'énergie, y compris la "Heavy consumer management" ( [1] [5]) pour un contrôle optimal des sources d'énergie en combinaison avec les plus gros consommateurs (confort).

Outre la mise en œuvre pratique des idées de systèmes, divers outils ont été développés dans le cadre du projet pour une conception rapide, optimale et minimisant les risques des systèmes. Entre autres, des méthodes de mesure concrètes pour l'enregistrement des profils de navigation existants et futurs, qui, en combinaison avec des études de base sur la construction navale (CFD et test de carène) et des simulations complètes de systèmes, permettent d'obtenir un pronostic fiable des fonctions du système et des CAPEX et/ou OPEX correspondants. Ces nouveaux outils et procédures pourraient non seulement être développés dans le cadre du projet, mais aussi ils sont été largement validés pendant le développement. Ils constituent la base de la conception de 7 autres navires qui ont été conçus et (re-)construits par Shiptec depuis la MS Diamant.

À la suite des constatations sur la fiabilité du fonctionnement des systèmes installés, faites dans les rapports intermédiaires [1] [2] [3], de vastes campagnes de mesure ont été menées, notamment en 2018 et 2019, qui visent à fournir toutes les données de base nécessaires à l'évaluation des performances des systèmes.

Le présent rapport final et la documentation de la campagne de mesure, mentionnée aussi dans la description du projet [4] s'appuient explicitement sur les conclusions examinées dans le rapport intermédiaire 2b du 30 juin 2017 [1]. Comme déjà mentionné dans les rapports intermédiaires de 2016 [2] [3], précédant le rapport intermédiaire 2b, le dernière part du projet soit être de clarifier l'efficacité et le fonctionnement du nouveau système hybride d'énergie et de propulsion par des mesures détaillées de l'énergie et des performances sur une certaine période. Dans ce cas-là, les mesures peuvent constater les conclusions faites dans les rapports précédents. L'objectif de ce rapport est de présenter ces résultats (y compris la présentation des potentiels d'optimisation).

Pour montrer ces données de consommation effective et de les comparer avec d'autres navires, cette dernière partie du projet "Système de propulsion hybride pour navire à passagers" [4] mesurera les flux d'énergie essentielle dans le cadre d'une campagne de mesure détaillée. En outre, les résultats seront comparés aux valeurs de planification et aux navires de comparaison. En plus, les analyses montrer des possibilités pour optimiser la demande totale d'énergie pour l'exploitation des navires.

Les domaines cibles suivants doivent être vérifiés avec ce rapport, ou traités comme le point final du projet :

- a) Identifier et mettre en œuvre les potentiels de réduction la consommation des combustibles et du CO<sub>2</sub>, sur la base de nouvelles technologies d'énergie et leur intégration dans un réseau principal, y compris des mesures de mise en œuvre concrètes.
- b) Vérification et classification des mesures prises (selon les séries de mesures mentionnées)
- c) Montrer des résultats efficaces : p. ex. approches générales de la conception, outils de conception spéciaux, outils de simulation, etc.

Au cours d'une grande campagne de mesure sur le MS Diamant, toutes les variables d'influence possibles ainsi que les réactions du ou des systèmes ont été enregistrées et consignées. Outre les données

de mesure réelles du système d'énergie et d'entraînement hybride, cela comprend également les effets secondaires des systèmes de climatisation et de restauration.

Pour ça, le système hybride d'énergie et de propulsion proprement dit, qui dispose déjà d'informations sur les principaux flux énergétiques, a été équipé d'un enregistreur de mesures. En outre, tous les états de fonctionnement du navire ont été enregistrés dans un enregistreur de données via une interface avec le système de gestion du navire (vitesses, position, nombre de passagers, températures, consommation de diesel, etc.). Le même enregistreur de données a également enregistré les données des systèmes auxiliaires (en particulier les charges de système climatisation et de gastronomie).

Toutes ces données et déclarations sont comparées et posées dans un contexte comparable, notamment concerne leur pertinence pour la consommation de carburant du navire. Toutes les entrées énergétiques ainsi que tous les consommateurs concernés ont été enregistrés afin d'évaluer une déclaration sur le potentiel d'optimisation et les éventuelles mesures à prendre.

Les principaux résultats suivants peuvent être extraits :

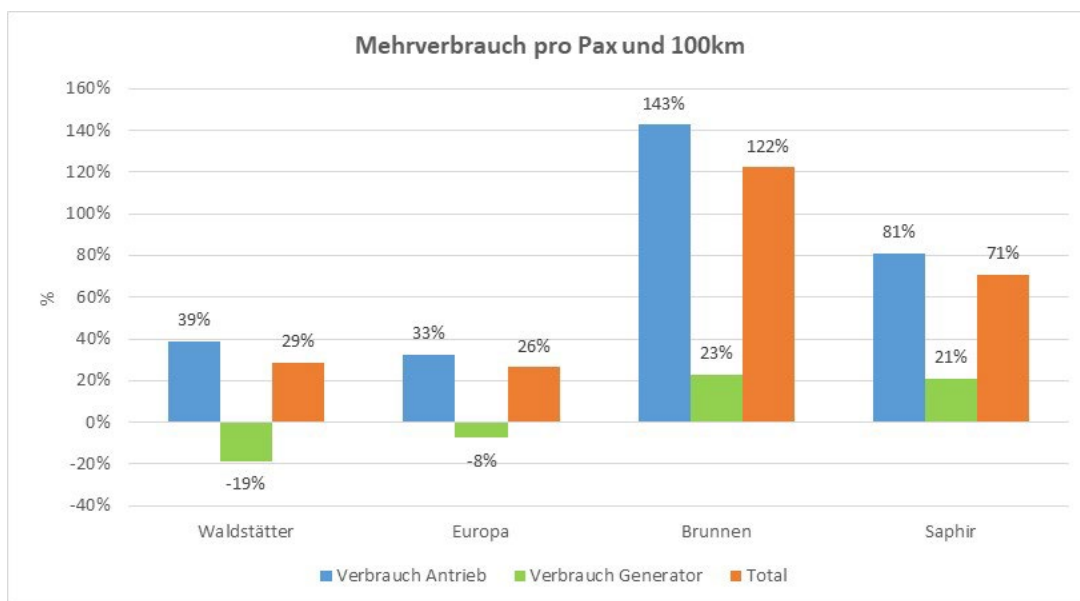
## RÉSULTATS (ÉCONOMIE D'ÉNERGIE) ET INTERPRÉTATIONS

De mars 2019 à octobre 2019, 132'158 litres de diesel ont été consommés, dont 80,8 % ont été utilisés pour la propulsion. Les 19,2 % de diesel restants ont été utilisés pour la production d'électricité et de chaleur avec la chaudière.

En partant de l'hypothèse qu'en raison du confort beaucoup plus élevé des passagers à bord du MS Diamant (par rapport aux navires de comparaison standard), la consommation d'énergie à bord augmente également (par exemple pour la climatisation, la cuisine plus grande, le système audio, l'ascenseur des passagers, etc.), dans un premier temps, une comparaison peut être faite pour une déclaration sur l'utilisation du système sans tenir compte de la consommation électrique à bord. Les déclarations et calculs effectués dans le document scientifique présenté au niveau international "Hybrid Energy and Propulsion System for Inland Navigation Vessels in Scheduled Services" [5] montrent que dans ce cas, on peut supposer une économie d'environ 25-30% (pour la propulsion) pour 100 tonnes de poids du bateau.

Si cette circonstance est maintenant examinée de plus près dans le cadre de la campagne de mesure décrite ici, des déclarations plus différenciées peuvent être faites à cet égard :

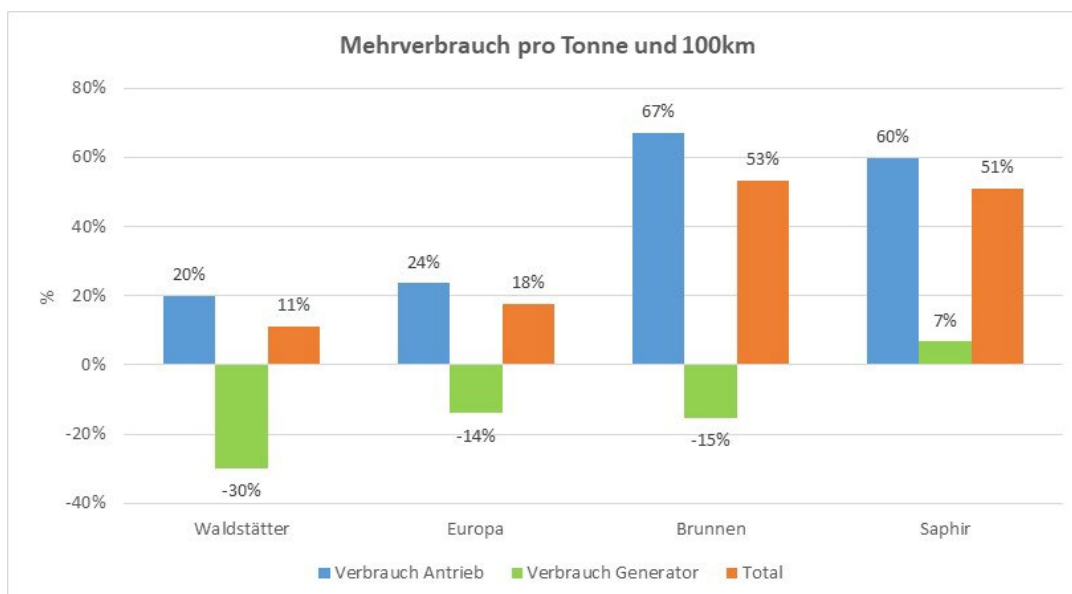
Si l'on considère la consommation pour la production d'électricité, on remarque que, comme mentionné dans [5], MS Diamant a une consommation marquante plus élevée que, par exemple, les navires comparables MS Waldstätter et MS Europa qui ont approximativement les mêmes durées et distances d'exploitation que MS Diamant. Comme mentionné dans [5], cette consommation supplémentaire de carburant pour la production d'électricité à bord s'explique relativement facilement : D'une part, MS Diamant a d'une très grande cuisine électrique à bord (les autres navires ont des cuisines à gaz à bord), d'autre part, au MS Diamant, le confort des passagers est beaucoup plus important (par ex. système HVAC). Les deux composantes contribuent principalement à une augmentation d'environ 20 % de la consommation d'énergie (ici pas la consommation de carburant). La consommation supplémentaire (relative, négative) correspondante des navires de comparaison par rapport à la MS Diamant est illustrée dans le diagramme suivant (consommation supplémentaire par rapport à la MS Diamant en fonction de la capacité des passagers et en distance de 100 km):



Ce diagramme montre que l'augmentation de 20 % des besoins énergétiques du réseau de bord mentionnée se traduit par une augmentation de 19 % de la consommation de carburant (sur la base de MS Waldstätter). Si l'on prend MS Europa comme référence, la consommation de carburant n'a augmenté que de 8 %. Si les 20 % d'énergie supplémentaire susmentionnés pour les exigences de confort de MS Diamant deviendraient être inclus dans le calcul pour les navires comparables, on peut dire que la consommation supplémentaire indiquée dans le diagramme peut être neutralisée ou même transformée en sous-consommation.

Compte tenu du fait que l'alimentation électrique de bord du MS Diamant doit être générée par deux étages d'onduleurs ou de redresseurs avec des rendements correspondants, on peut dire que d'une part le transport de l'énergie stockée provenant de l'alimentation à quai (batteries) et d'autre part la génération efficace à l'aide des générateurs hybrides (shaft generator) dans un très bon rendement de moteur diesel compensent cette perte de rendement électrique.

Pour montrer le rendement d'un système hybride par rapport à un système conventionnel, il ne suffit pas de faire une comparaison par pax possible (ce qui est certainement correct en ce qui concerne la consommation d'énergie à bord). Il faut plutôt faire une comparaison par rapport à une tonne de poids du navire. Finalement, la résistance du navire est directement proportionnelle au poids du navire et influence donc directement le besoin d'énergie du système de propulsion. Les valeurs de comparaison correspondantes sont indiquées dans le diagramme suivant :





Ce diagramme montre les valeurs les plus importantes pour la consommation supplémentaire de la propulsion (par rapport à MS Diamant). On remarque ici que la MS Diamant est 20% plus performante que la MS Waldstätter et environ 24% plus performante que la MS Europa. Ceci est dû à la possibilité de réduire la taille des moteurs diesel de propulsion par le système hybride (fonctionnement avec un rendement moteur plus optimal) ainsi que l'avoir la possibilité d'égaliser des pics dans les processus dynamiques.

Afin de pouvoir faire une conclusion suffisamment claire sur l'efficacité du système dans son ensemble, il faut supposer une combinaison des deux comparaisons. D'une part, la comparaison est basée sur la pax max., d'autre part sur le poids du navire. Il semble toutefois important que les déclarations faites dans le rapport intermédiaire 2b [1] et dans le document scientifique présenté au niveau international « Hybrid energy- and propulsion system for vessels in timetable operation » [5] concernant les économies comparables de carburant et de CO<sub>2</sub> puissent être confirmées. Au total, on peut supposer des économies d'environ 20 à 30 % (selon l'approche). Ceci est particulièrement vrai si l'on considère que les navires conventionnels/traditionnels auraient une consommation d'énergie d'environ 20% supérieure s'ils avaient les mêmes exigences de confort que le MS Diamant. En moyenne (sur l'ensemble des charges et des cours opérationnelles possibles), une valeur d'environ 23,6 % peut donc être indiquée.

En plus des mesures réelles par rapport au système hybride, des mesures profondes des systèmes de confort du MS Diamant ont également été effectuées dans le cadre du projet CTI "Navire à passagers à haut rendement énergétique" [6], qui a été réalisé avant la construction du MS Diamant. En particulier, il est apparu que la régulation et la commande du système CVC présentaient encore un potentiel d'optimisation. On a pu constater qu'en raison de réglages incorrects (ou d'une mauvaise utilisation par l'équipage), la phase de chauffage du navire effectue une vidange rapide du réservoir de stockage de chaleur intégré avant même le début de course effectif. La chaudière supplémentaire fonctionne donc beaucoup plus qu'elle n'a été planifiée. Les résultats des mesures ont également montré que la climatisation en été est beaucoup trop souvent exploitée à l'aide du refroidisseur à haute intensité énergétique. Le refroidissement passif (refroidissement de l'air avec de l'eau de lac) devrait être utilisé plus souvent. On peut également supposer ici qu'un réglage des paramètres de commande peut aider.

## COMPARAISON AVEC LA PLANIFICATION

Par rapport à la planification, on peut dire aujourd'hui que les économies prévues et le comportement prévu du système d'énergie et de propulsion hybride ont été atteints ou dépassés. Par exemple, une prévision DNVGL [7] d'environ 13,5% de consommation en moins par rapport à un navire de référence peut servir de comparaison. Ici, les valeurs ont été dépassées et en même temps, il a été démontré que le système fonctionne de manière fiable, avec une haute disponibilité et de multiples redondances [8]. Ce n'est pas (encore) le cas pour les systèmes de confort. En particulier, les temps d'utilisation de la chaudière et l'utilisation de la machine frigorifique laissent de la place pour des potentiels d'optimisation.

Outre les chiffres de comparaison effectifs, des comparaisons entre l'outil de simulation développé dans le projet et les valeurs de mesure réelles ont pu être effectuées au cours du projet. Ces comparaisons montrent un écart général d'environ  $\pm 2-3\%$  entre la simulation et la réalité. Ces valeurs ont pu être vérifiées plusieurs fois dans des projets de comparaison. En plus, les méthodes de mesure, les méthodes de conception et les outils de simulation développés dans le cadre du projet ont été constamment optimisés entre-temps et ont été appliqués dans divers autres projets pour différentes compagnies maritimes en Suisse.

## CONSIDÉRATION ÉCONOMIQUE

Une analyse économique réalisée jusqu'à ce jour montre que les délais d'amortissement des frais supplémentaires du système, par rapport aux systèmes conventionnels, peuvent être confirmés de manière approximative. Avec ses environ 6,5 ans, elle correspond à peu près à la moitié de la durée de vie prévue du système de propulsion principal. D'autres conclusions, notamment basées sur d'autres projets réalisés depuis le MS Diamant, ont montré que ces temps dépendent fortement de l'utilisation effective (au niveau temps) et le mode d'utilisation d'un navire équipé avec le système. Cela signifie qu'en fonction du mode d'exploitation du navire (hybride, exploitation combinée, comme le MS Diamant ou exploitation hybride avec propulsion électrique pure, comme le MS Bürgenstock), ainsi que du nombre d'heures d'opération du navire par an, ces délais d'amortissement peuvent être massivement réduits (par exemple le MS Bürgenstock : environ 3,2 ans).

De ce point de vue, on peut dire que les systèmes hybrides sont économiquement intéressants. On plus, on peut également dire que le potentiel (économique) des moteurs éclectiques est très prometteur.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Outre la confirmation des premiers calculs concernant les potentiels d'économie d'énergie et la confirmation de l'efficacité des méthodes et outils développés dans le cadre du projet, les résultats de la campagne de mesures qui vient de s'achever montrent qu'il existe encore un potentiel d'optimisation supplémentaire. Ce potentiel doit être exploité dans un avenir proche (horizon temporel jusqu'à fin 2020-2021). Grâce à la grande variabilité des paramètres des systèmes (système principal et sous-systèmes), il est possible de réaliser d'autres boucle d'optimisation sans modifier le hardware. Cela s'applique en particulier :

- L'optimisation du concept d'équilibrage des peak, c'est-à-dire surtout l'utilisation du booster et du générateur hybride sur les deux machines d'entraînement principales.
- L'optimisation du système batterie management, combinée à une formation complémentaire de l'équipage.
- L'enregistrement et l'évaluation automatiques des conditions de fonctionnement dynamiques et non-dynamiques, ainsi que leur utilisation pour des futures logicielles d'auto-apprentissage en cas de révision de la commande.

En plus des optimisations actuelles dans le domaine de système hybride d'énergie et propulsion, les données de mesure disponibles ont montré que divers travaux d'optimisation sont nécessaires dans le domaine de l'électricité de confort et de la climatisation. Cela concerne en particulier les domaines suivants :

- Le contrôle du système de chauffage, et surtout le chauffage du navire le matin avant le cours régulier.
- Le refroidissement actif ou passif. Ici, les données de mesure ont montré que, par rapport à la prévision, trop d'énergie circule dans le refroidissement actif (par le refroidisseur).

Outre l'exploitation effective du navire MS Diamant, les plus grands résultats du projet 050 "Système hybride d'énergie et de propulsion pour un navire à passagers" sont les expériences maintenant disponibles dans la conception de tels systèmes complexes. Ici, la simulation précédente des systèmes peut et doit être mentionnée. Ce n'est que grâce à cette méthode fiable (qui est normalement toujours basée sur des données de mesure réelles des navires identiques ou similaires ainsi que de modes de fonctionnement identiques ou similaires) qu'une réduction de taille des composants peut être réalisée avec un faible risque de conception. C'est la seule façon d'exploiter pleinement le potentiel de MS Diamant. Cela s'applique en particulier au domaine où les rendements de l'électronique de puissance jouent un rôle important dans la conception. Ici, les connaissances préalables exactes de l'utilisation et du comportement du navire/des systèmes décide du succès ou de l'échec d'un projet.

Les points susmentionnés concernant la connaissance exacte de l'opération (future) ainsi que la méthodologie de simulation ont déjà été mis en œuvre sur sept autres navires depuis le projet sur le MS Diamant (MS Waldstätter, MS Bürgenstock, Naviexpress, MS Berna, MS Jungfrau, MS Rudolf, MS Traun). Les résultats obtenus dans la réalité montrent l'efficacité des outils développés. En outre, quinze autres navires (en Suisse et en Europe) ont déjà été prévus et attendent la mise en œuvre d'un projet, respectivement le déblocage du budget pour une transformation ou une construction neuve. Dans les conceptions et prévisions, tous les systèmes, y compris la philosophie de gestion de l'énergie mise en œuvre dans la MS Diamant ainsi que la demande et l'arrêt des consommateurs lourds [1]. Cela montre l'adéquation des outils développés ainsi que le succès des concepts correspondants.

En résumé, on peut dire que le Projet 050 a déclenché une énorme poussée sur le marché suisse (et international) de la navigation intérieure en faveur de systèmes efficaces en énergie et à faible émission. Cela montre non seulement par des demandes concernant les conversions et les nouvelles constructions (avec ces nouveaux systèmes ou leur évolution), mais aussi du vif intérêt des compagnies maritimes suisses pour les analyses détaillées des installations existantes. Toujours sur la base des outils et des méthodes développés dans le cadre du projet et des simulations qui en résultent. Afin pour déterminer le potentiel correspondant.

Les articles scientifiques et les conférences résultant du projet ont également attiré l'attention internationale dans l'industrie. Les publications [5] dans le Jahrbuch 2018 de la Schiffbautechnische Ge-

sellschaft ainsi que les conférences et publications dans le cadre de conférences internationales peuvent être mentionnées (RINA @ Europort 2017, Congrès CIMAC 2019 à Vancouver, Electric and Hybrid Marine Technology World Congress 2018 à Amsterdam, 19th NAV Congress à Trieste, etc.).

Néanmoins, l'équipe de projet de Shiptec AG est sur le point de franchir les prochaines étapes vers un navire zéro émission. En particulier pour l'utilisation intensive dans les transports publics et le trafic régulier (similaire au MS Diamant), l'équipe de projet passe déjà à l'étape suivante. En raison de la faible densité d'énergie des batteries et des faibles besoins en énergie électrique sur les jetées par rapport à la demande en énergie du service horaire, une exploitation purement électrique incluant un prolongateur d'autonomie est seulement limitée possible. Une solution basée sur un prolongateur de pile à combustible à hydrogène est particulièrement adaptée ici. Contrairement à la navigation maritime, il existe en Suisse des conditions particulières pour utiliser efficacement et à relativement bon marché hydrogène qui est produite de manière durable pour les bateaux de la navigation intérieure; avec des risques et des besoins en espace acceptables. Voir le rapport sur le projet Helios, financé par la BfE, publiée à l'automne 2019 [9].

## 1. Ausgangslage

Dieser Schlussbericht, bzw. die Dokumentation der im Projektbeschrieb [4] erwähnten Messkampagne baut explizit auf den Erkenntnissen auf, welche im Zwischenbericht 2b vom 30. Juni 2017 [1] erörtert wurden. Wie bereits auch in den, dem Zwischenbericht 2b vorangegangenen Zwischenberichten von 2016 [3] [2] erwähnt wurde, sollen die bis dahin gemachten Erkenntnisse durch ausführliche Energie- und Performancemessungen über eine gewisse Zeit, Klarheit über die Wirksamkeit und Funktion des neuen hybriden Energie- und Antriebssystem für Fahrgastschiffe liefern. Mit diesem Bericht sollen einerseits diese Erkenntnisse aufgezeigt werden (inkl. allfälliger Darstellung von Optimierungspotential), andererseits aber auch eine «Gesamt-Show» in Bezug auf den Energiebedarf über das gesamte Pilot-schiff gemacht werden. «Gesamt-Show» heisst in diesem Zusammenhang, dass nicht nur die eigentliche Energieumsetzung für Antrieb und elektrischem Bordnetz betrachtet wird, sondern auch die Energieverbräuche für Subsysteme wie Wärme- und Kälteerzeugung, sowie die Aufteilung des Bordnetzes in seine Hauptverbraucher. Dies immer im Kontext einer gesamtheitlichen Betrachtung in Bezug auf das System Schiff wie auch unter Berücksichtigung einer Verifizierung der im KTI-Projekt «Energieeffizientes Fahrgastschiff» [6] aufgeführten Massnahmen.

Damit diese effektiven Verbrauchsdaten aufgezeigt und mit anderen Schiffen verglichen werden können, werden in diesem letzten Teil des Projektes «Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff» [4] die wesentlichen Energieverbräuche im Rahmen einer ausführlichen Messkampagne gemessen. Weiter werden die Ergebnisse mit den Planungswerten sowie Vergleichsschiffen verglichen und mögliche Massnahmen zur Reduktion des Gesamt-Energiebedarfs für den Schiffsbetrieb aufgezeigt.

## 2. Ziel der Arbeit

Wie z.T. schon in den vorangegangenen Zwischenberichten [1] [3] [2] erwähnt sowie im Projekt beschrieb [4] aufgeführt, können im grossen und ganzen drei Zielbereiche definiert werden:

- a) Potentiale zur Treibstoff- und CO<sub>2</sub>-Reduktion aufgrund neuer Technologien und neuer, vernetzter Energie- und Antriebstechnologien identifizieren und umsetzen
- b) Verifizieren und einordnen der getroffenen Massnahmen (nach den erwähnten Messreihen)
- c) Effektive Outcomes aufzeigen: z.B. allg. Ansätze für Auslegungen, spezielle Auslegungswerkzeuge, Simulationstools, usw.

Zusätzlich zu diesen im eigentlichen Projekt definierten Zielen wird auch der Verifizierung der Massnahmen aus dem erwähnten KTI-Projekt [6] Beachtung geschenkt. Dies v.a. um der hohen Vernetztheit der verwendeten Energiesysteme Rechnung zu tragen.

Alle drei, bzw. im totalen vier Zielbereiche werden in diesem Bericht abgehandelt bzw. den in [4] definierten, zu erwartenden Resultaten gegenüber gestellt.

## 3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Die Umsetzung und Integration der verschiedenen Systeme und Teilsysteme im Schiff (Teil der Projekte [4] und [6]) sind bereits in den entsprechenden Berichten abgehandelt ([1] [3] [2] und [6]). Die Kenntnis der in diesen Berichten erwähnten/aufgeführten Resultate, Methoden und Prozessen wird als Grundvoraussetzung für das weitere Vorgehen, insbesondere das Setup des Messaufbaus, sowie der Auswertung der Messresultate angenommen. Daher wird auf die Methodik, den in den Berichten [1] [3] [2] [6] erwähnten Forschungsansatz, bzw. Wissensstand nicht mehr im speziellen eingegangen. Vielmehr sollen hier die Methodik und die Umsetzung der nötigen Messeinrichtung beleuchtet werden.

Insbesondere umfasst dies das folgende Konzept zur Messdatenerfassung:

Für das Monitoring wurde als Basis ein gewöhnlicher PC mit Windows 10 verwendet. Auf diesem Rechner wurde basierend auf National Instruments LabVIEW und Microsoft C# das Monitoring des MS Diamant entwickelt.

Nach Möglichkeit werden die Messdaten jedes Messgeräts mit entsprechenden Gateways auf Ethernet gebracht und da von LabVIEW mit einer Abtastezeit von einer Sekunde abgeholt und im TDMS-Dateiformat von National Instruments auf der internen Harddisk gespeichert. Abbildung 1 zeigt die verwendete Messinfrastruktur mit der Raumangabe, wo die Geräte auf dem Schiff eingebaut wurden. Durch die Anbindung über den Datenbus Ethernet können viele Fühler und Messwerte, welche bereits in anderen Systemen zur Verfügung stehen, ohne nochmals eigens für das Messsystem installiert zu werden, kostengünstig genutzt werden. Dies erspart Kosten von zusätzlichen Fühlern und Messgeräten. Der Nachteil der Verwendung «fremder» Fühler und Messgeräte besteht in der Messgenauigkeit, da diese oft grösseren Messunsicherheiten ausweisen, sowie die Zuverlässigkeit geringer sein kann als eine eigenständige Messung. Für jedes Messgerät wurde ein Treiber für die Integration in den Data-Logger geschrieben. Die Daten der HLK wurden über das Gateway OZW72 vom Siemens Synco Living übernommen. Zur Wärme- und Kältemessung wurden elf Wärmezähler eingebaut, welche über ein M-Bus Gateway ausgelesen werden. Die elektrische Energie der Kältemaschine wird mittels Stromzangen gemessen. Der Mess-PC ist an einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) angeschlossen und ins Netzwerk der SVG Holding eingebunden. Über dieses Netzwerk werden die Messdaten täglich auf einem Server der Shiptec gespeichert und stehen für die weitere Datenauswertung zur Verfügung.

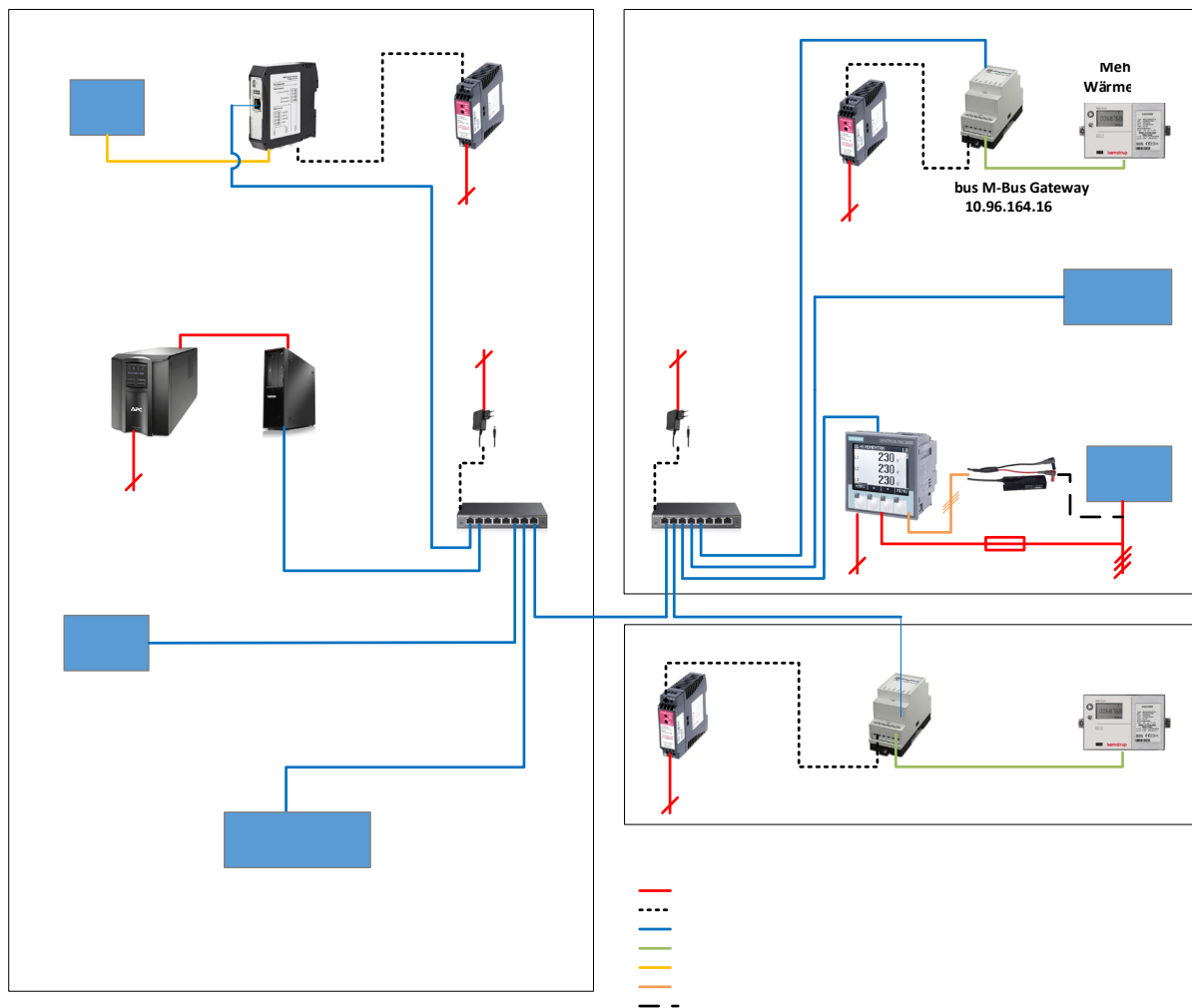


Abbildung 1: Systemübersicht Monitoring MS Diamant

### 3.1 SYSTEMERFASSUNG

#### 3.1.1 Hybridsystem, Antrieb und Energieversorgung

Das hybride Energie- und Antriebskonzept ist in Abbildung 2 dargestellt. Wie bereits in [4] und [3] erwähnt, wird die gesamte, umgesetzte elektrische Energie (sei es zum Fahren, Boosten oder als Bordnetz) der in 650 VDC umgewandelt und entweder in Batterien zwischengespeichert oder in das 400 VAC gespiesen und an die Verbraucher weitergeleitet. Das Schiff wird mit den beiden dieselbetriebenen Hybridantriebseinheiten A1 und A2 angetrieben. Teil dieser Antriebseinheiten sind die Wellen- bzw. Hybridgeneratoren, die entweder als eigentliche Generatoren oder als Booster (zur Unterstützung der viel zu kleinen Hauptantriebsdieselmotoren) arbeiten. Im Normalbetrieb genügt die Stromproduktion dieser Einheiten 1 und 2 zur Versorgung des Schiffes. Falls dies nicht ausreicht stehen die beiden Generatoren 3 und 4 zur Deckung des fehlenden Strombedarfs zur Verfügung (v.a. bei grossen Events und sehr hohen Küchenlasten).

Der Dieselverbrauch der Antriebsmotoren (D\_A1 und D\_A2) sowie der Generatoren (D\_G3 und DG\_4) wird gemessen und aufgezeichnet. Der Dieselbedarf der Generatoren G1 und G2 welche hybrid zum Antrieb laufen, wurde mit einem mittleren Dieselverbrauch von 240 g Diesel pro kWh berücksichtigt.

Die elektrische Energie (grüne Kreise E\_xx) wird aus der gemessenen Leistung, welche im Minutenintervall ausgelesen wird, berechnet. Es können somit sämtliche «chemische» wie auch elektrische Energieströme gemessen und bilanziert werden. Zusätzlich bieten die parallel laufenden Hochgeschwindigkeitsmessungen (<50 Hz) die Basis für die Überprüfung der verschiedenen dynamischen Funktionen. Als Beispiele können hier u.a. die sehr schnelle Wellengeneratorumschaltung von Generator auf Boostbetrieb und zurück, sowie gesamtheitliche dynamische Betrachtung der Heavy-Consumer-Requests vom Power Management System, erwähnt werden. Die entsprechenden Informationen, Resultate und Schlussfolgerungen zu diesen spezifischen Optimierungspunkten (mit dem Ziel «die richtige Energie zum richtigen Zeitpunkt von der richtigen Quelle») können dem Zwischenbericht 2b [1] und dem Paper [5] entnommen werden.

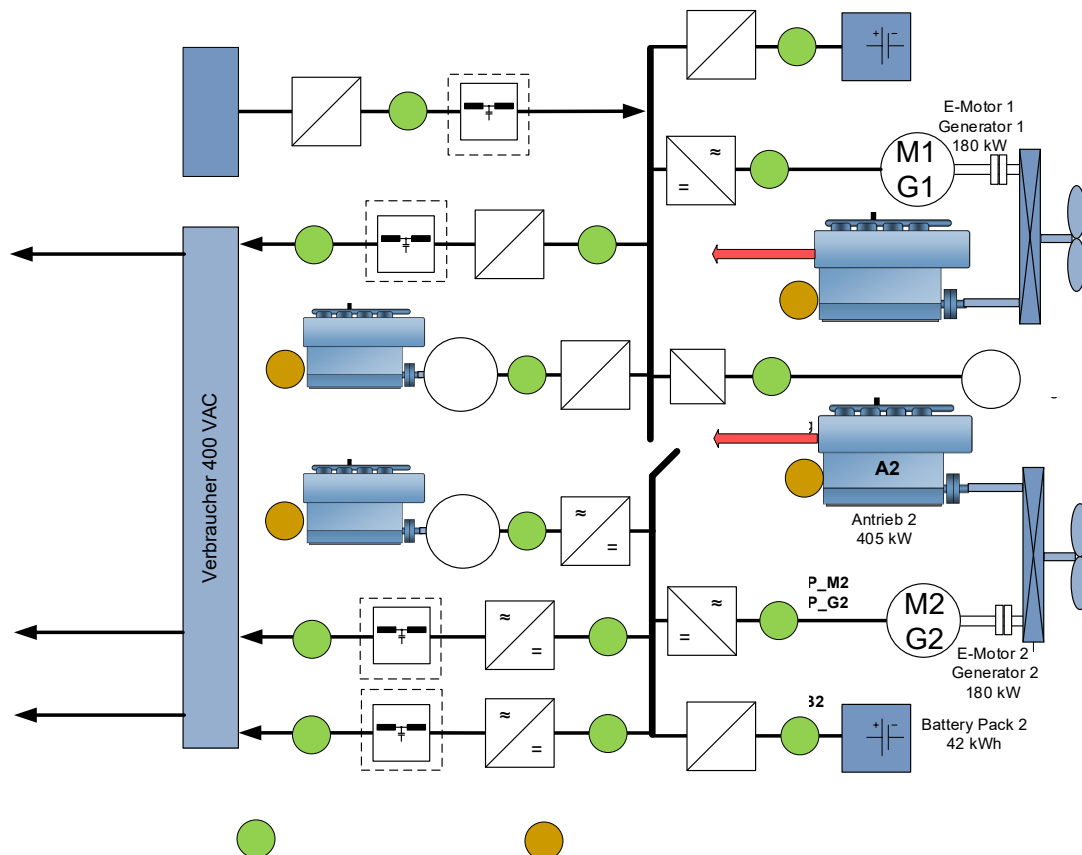


Abbildung 2: MS Diamant Hybrides Energie- und Antriebskonzept

### 3.1.2 Energiebilanz und (im speziellen) HLK

Zur Messung der Raumlufttemperatur und Raumluftqualität wurde pro Raum nur ein Sensor verwendet. Die Platzierung der Raumlufttemperaturfühler sowie der CO<sub>2</sub>-Fühler sind oben in Abbildung 3 eingezeichnet.

Das vereinfachte Schema der HLK-Anlagen ist in Abbildung 4 dargestellt. Ein Teil der Abwärme der beiden Hybridantriebseinheiten wird über die Wärmetauscher im zentralen Wärmespeicher mit dem Volumen von 3000 Liter gespeichert. Weitere Wärme wird nach Bedarf vom Heizkessel bereitgestellt. Alle Wärmebezüge sind am Wärmespeicher angeschlossen. Das Warmwasser wird direkt ab dem Speicher über die Frischwasserstation bereitgestellt. Das Schiff wird, mit wenigen Ausnahmen wie dem Eingangsbereich oder den WCs, wo zusätzlich Radiatoren angebracht wurden, mit der Zuluft der Lüftungsgeräte geheizt und gekühlt. Mit dem Lüftungsgerät 1 werden die beiden Salons im Haupt- und Oberdeck zweistufig geheizt und gekühlt. Dabei wird der 1. Wärmetauscher im Lüftungsgerät zum Heizen und nach Umschaltung des Umschaltventils zur passiven Kühlung mit Seewasser genutzt. Mit dem zweiten Wärmetauscher wird im Kühlbetrieb, die mit Seewasser vorgekühlte Luft aus dem Wärmetauscher 1, im zweiten Wärmetauscher zusätzlich mit Kälte der Kältemaschine versorgt. Die Luftmenge wird abhängig von der Aussenlufttemperatur und der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Salon gesteuert.

Mit dem Lüftungsgerät 2 werden die restlichen Räume im Ober- und Hauptdeck geheizt und passiv mit Seewasser gekühlt. Eine aktive Kühlung wurde nicht hier eingebaut, da bei den angeschlossenen Räumen wie auch bei der Erschliessung des Bugsalons auf eine aktive Kühlung verzichtet wurde.

Als einzige Anlage verfügt das Lüftungsgerät 3 der Küche über eine Wärmerückgewinnung (WRG). Bei den anderen beiden Lüftungsgeräten wird die Abluft nach aussen geführt. Da in der Küche hohe Luftwechselraten erforderlich sind, wurde eine WRG als Kreisverbundsystem zwischen den beiden Wärmetauschern im Lüftungsgerät eingebaut.

Die Wärme- und passiven Kältebezüge der Lüftungsgeräte werden mit Ultraschallwärmesensoren gemessen. Bei der aktiven Kälte der Kühlanlage wurde kein Wärmesensor eingebaut. Die Kühlenergie wurde aus der elektrischen Energiemessung der Kältemaschine mit dem mittleren COP von 4.5 berechnet. Der Ölverbrauch des Kessels wurde aus den Betriebsstunden der Stufe 1 und 2, mit dem bei der Inbetriebnahme gemessenen Ölverbrauch von Stufe 1 10.9 L/h und Stufe 2 4.79 L/h, berechnet.

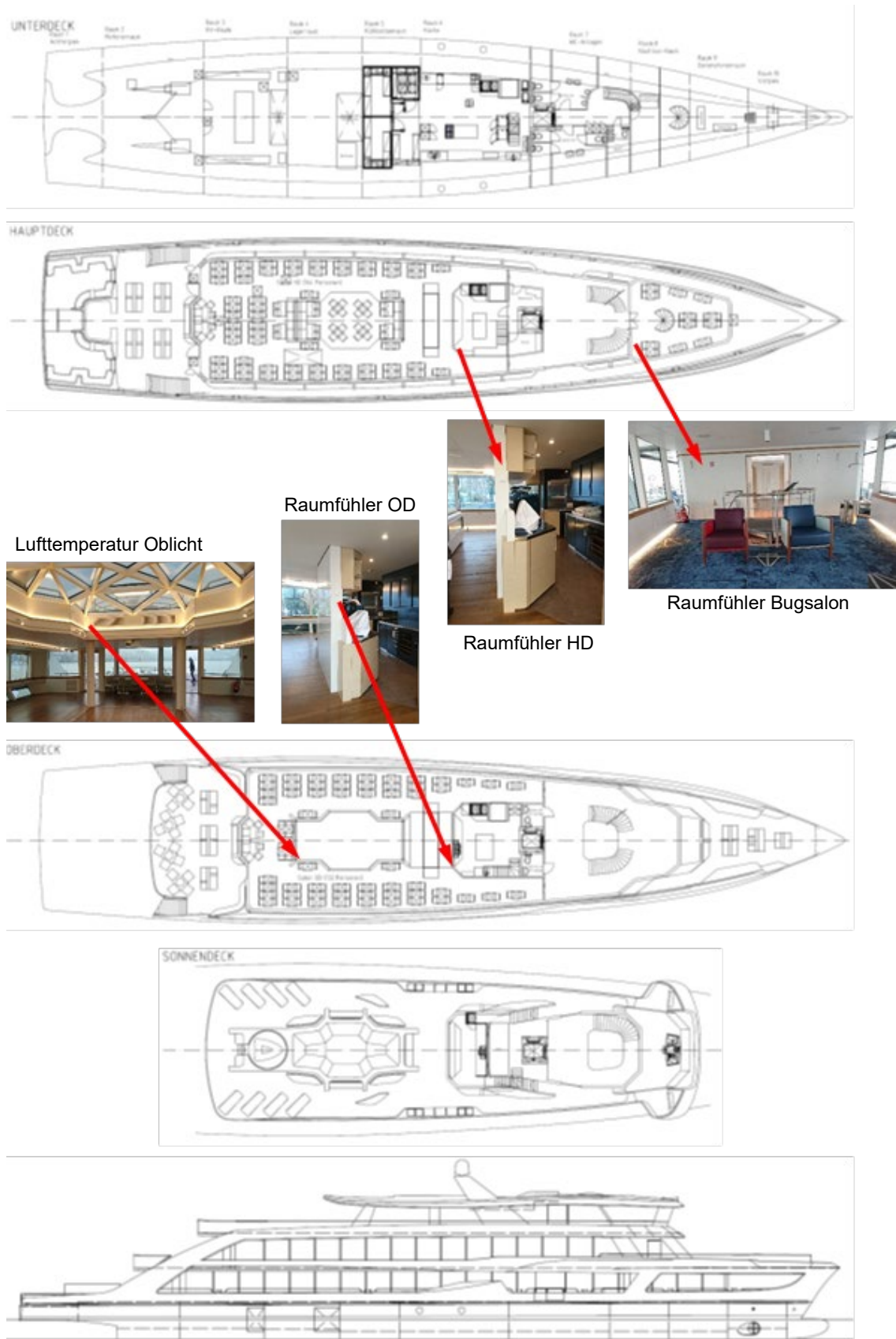


Abbildung 3: Grundrisse der Decks und Seitenansicht MS Diamant mit Einbauorten der Temperaturfühler



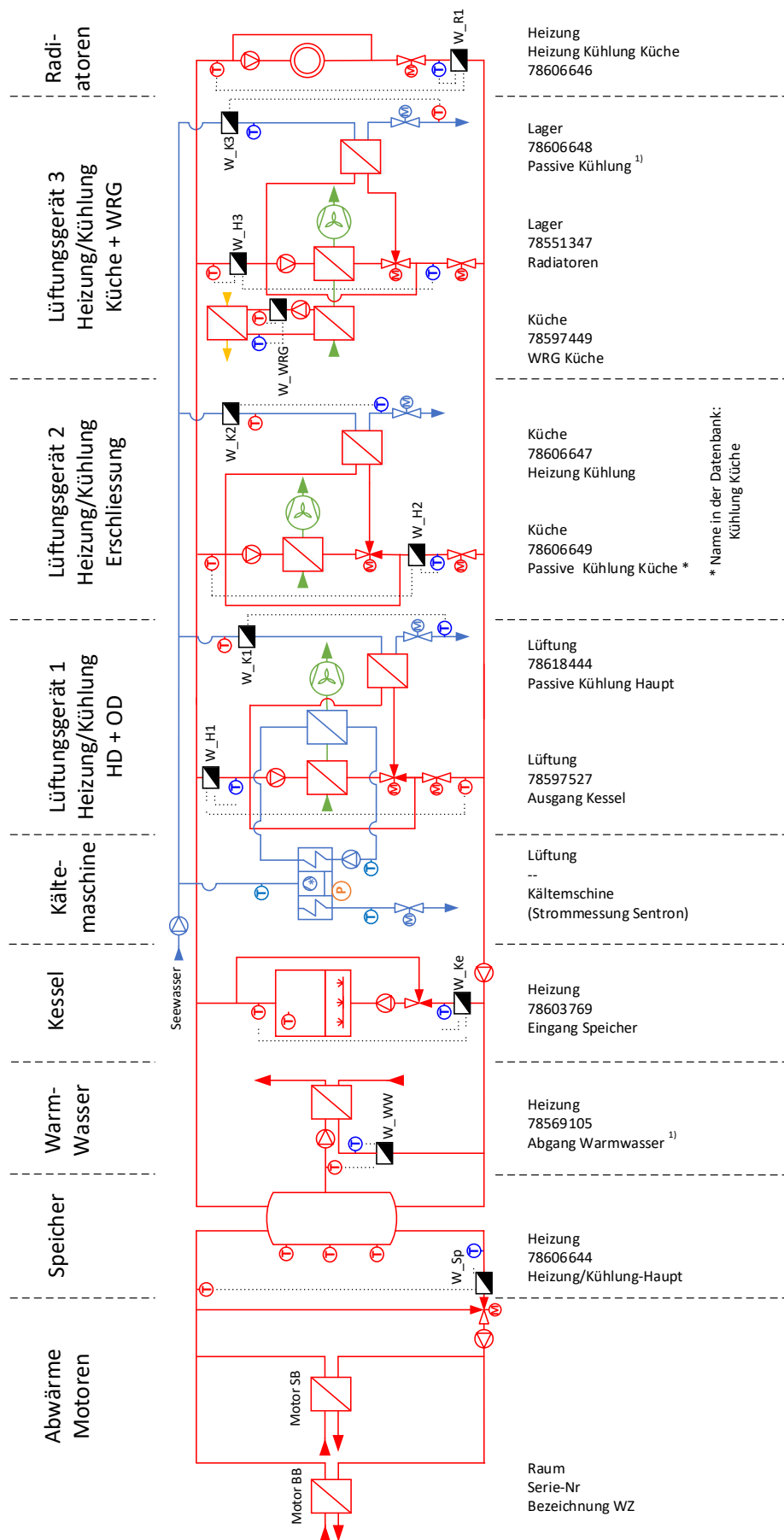


Abbildung 4: Schema HLK MS Diamant

### 3.1.3 Berechnungsmethoden zum Vergleichen von Systemperformance (qualitativ und quantitativ)

Neben diesem relativ komplexen Aufbau, welcher zeigt, wie die effektive Langzeiterfassung auf dem Pilotschiff durchgeführt und ausgewertet wird, können gem. dem Paper «Hybrid energy- and propulsion system for vessels in timetable operation» [5] folgende Ansätze zum Vergleich von Messdaten unterschiedlicher Schiffe herangezogen werden:

- Herunterbrechen der Verbrauchszahlen bei gleichem Operationsprofil auf das Schiffsgewicht (betriebsbereit) [10]
- Herunterbrechen der Verbrauchszahlen bei gleichem Operationsprofil auf die Anzahl der zugelassenen Passagiere

Beide Ansätze können eine mehr oder weniger neutrale Aussage über den Treibstoffverbrauch pro Tonne Schiff oder pro möglichen Passagier bieten, wobei der Verbrauch pro Gewicht, wegen der höheren Gewichtsanteile des eigentlichen Schiffes gegenüber dem Passagiergewicht z.T. bevorzugt wird. Diese Methode ist im Schiffbau nicht ungewöhnlich und wurde auch im Paper [5] als Referenz herangezogen. Siehe dazu auch Kap. 4.1.

Wegen der sicherheitstechnischen Relevanz des gesamten, hybriden Energie- und Antriebssystems sei hier auf die für MS Diamant speziell entwickelten Sicherheitskonzepte verwiesen. Diese werden jedoch im restlichen Bericht (nicht Teil dieses Projektes) nicht mehr erwähnt. Entsprechende Hinweise, Erkenntnisse oder auch Vorlagen für zukünftige Standards zur Überprüfung solcher Systeme können im Bericht «Untersuchung des Redundanz- und Sicherheitskonzeptes des Hybridantriebs von MS Waldstätter» [8] eingesehen werden. Die darin erwähnten Überprüfungen wurden zwar nicht anhand des Pilotschiff MS Diamant gemacht, jedoch am MS Waldstätter der SGV-Flotte, das im Winter 2018/19 auf das gleiche hybride System umgerüstet wurde. Weiter können im Zusammenhang mit diesem Umbau genauere Daten in Bezug auf die möglichen Einsparungen bei Treibstoff, CO<sub>2</sub> und Wartungskosten gesammelt werden. Unter Berücksichtigung eines nicht so grossen «Strausses» möglicher Optimierungspotentiale bei einem umgebauten Schiff (vs. Neubau), können hier zusätzlich zu den in diesem Bericht erwähnten Resultate, Potentiale für bestehende Schiffe identifiziert werden.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

Neben den hier ausgewiesenen Resultaten, welche alle auf Langzeitmessungen beruhen, wird hier explizit auf die Messungen, Systembeschreibungen und -funktionen, Versuche und Schlussfolgerungen im Zwischenbericht 2b dieses Projektes [1] wie auch und im speziellen auf die Ausführungen im Paper «Hybrid energy- and propulsion system for vessels in timetable operation» [5] verwiesen. Im Grossen und Ganzen, sind die darin enthaltenen Resultate auch nach den entsprechenden Langzeitmessungen gültig, wobei die aus den hier beschriebenen Ergebnissen zu schliessenden Schlussfolgerungen nicht eingeflossen sind. Siehe dazu auch Kapitel 4 und 5.

Zu beachten ist aber in jedem Fall, dass die hier aufgezeigten Messergebnisse immer die Energiebetrachtungen, welche dem hybriden Energie- und Antriebssystem zu Grunde liegen beinhalten. Dies insbesondere bei den Betrachtungen der Aufteilung in Treibstoff-, Gesamtenergie sowie dem Vergleich zwischen verschiedenen Schiffen gem. 4.1. Dabei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere der Energiebedarf für Antrieb und Stromerzeugung immer ein Mix aus Treibstoffverbrauch bei den Antriebsdieselmotoren und Generatormotoren, sowie der Zuführung elektrischer Energie von Land ist. Sei es bei einem «konventionellen» oder auch beim hybriden Konzept.

Wegen des Unfalls des MS Diamant vom 07.12.2017 und der darauffolgenden Prioritätensetzung zur kommerziellen Wiederinbetriebnahme im Frühling/Sommer 2018, konnte das vorgesehene Messsystem mit allen Komponenten (nicht nur die hochdynamischen) erst Anfang März 2019 in Betrieb genommen werden. Leider (v.a. am Anfang) mit hohen Unsicherheiten im Betrieb. So mussten leider diverse Messunterbrüche aufgrund von ungeplanten Stromunterbrüchen am Schiff in Kauf genommen werden, dies obwohl der Messlogger mit einer USV ausgerüstet war. V.a. die verwendeten Bus-Gateways stellten sich dabei als besondere Herausforderung dar, da diese nach einem Stromunterbruch (was bei einem Schiff am Landstrom immer mal wieder passieren kann) wieder manuell gestartet werden mussten. Ab Mai 2019 konnte dies aber, dank einer automatischen Erkennung, früh erkannt werden und so die Ausfalltage minimiert werden.

Abbildung 5 zeigt die verwendeten drei Betriebszeiten Fahrt, Stegbetrieb und Standby des Schiffes für jeden Monat. Die Betriebsarten wurden wie folgt definiert:

Fahrt: Kein Energiebezug vom Land und die Heizung / Kühlung ist eingeschaltet  
 Stegbetrieb: Energiebezug vom Land und die Heizung / Kühlung ist eingeschaltet  
 Standby: Heizung / Kühlung ist ausgeschaltet (Frostbetrieb)

Das Schiff ist pro Monat zwischen 218 und 309 Stunden in der Betriebsart Fahrt und steht fast zur Hälfte ungenutzt am Steg in der Betriebsart Stegbetrieb oder Standby.

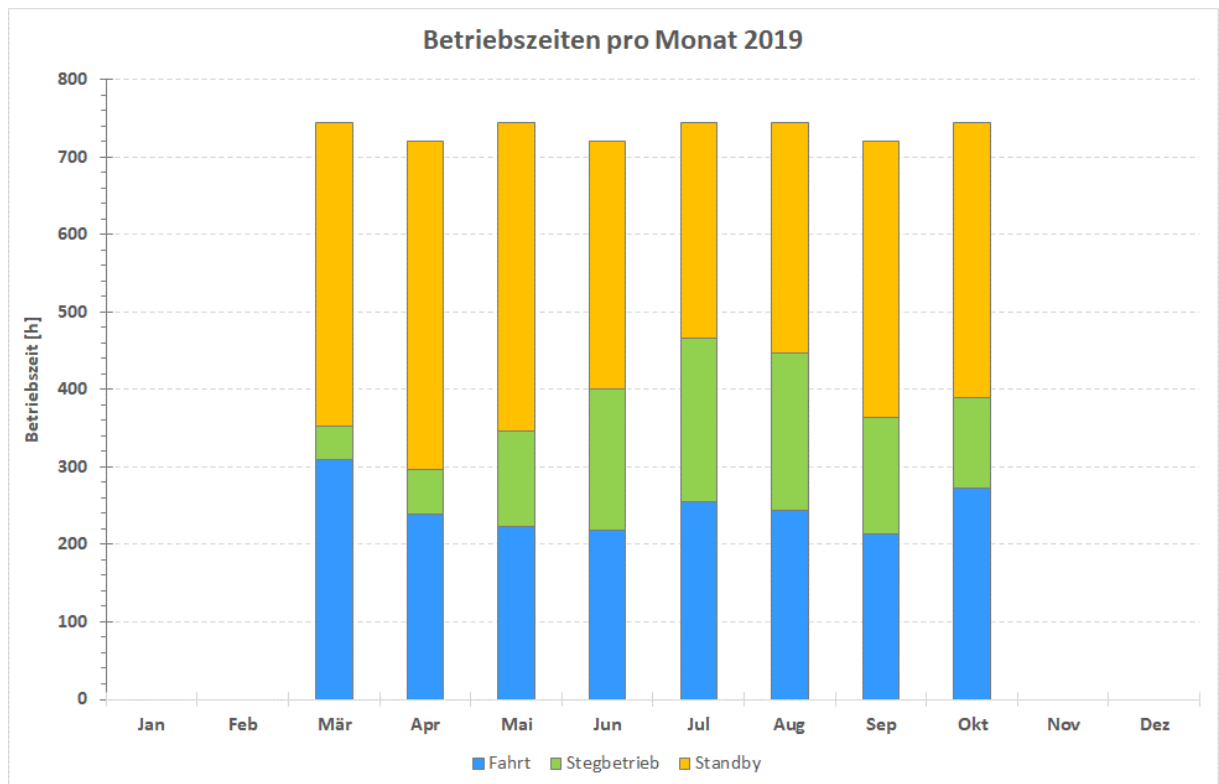


Abbildung 5 Aufteilung der Betriebszeiten

In der Betrachtungsperiode vom 1. März bis 31. Oktober war das Schiff 5'880 in Betrieb, wovon 48 % im Standby, 34 % in Fahrt und 18 % im Stegbetrieb. (Abbildung 6)

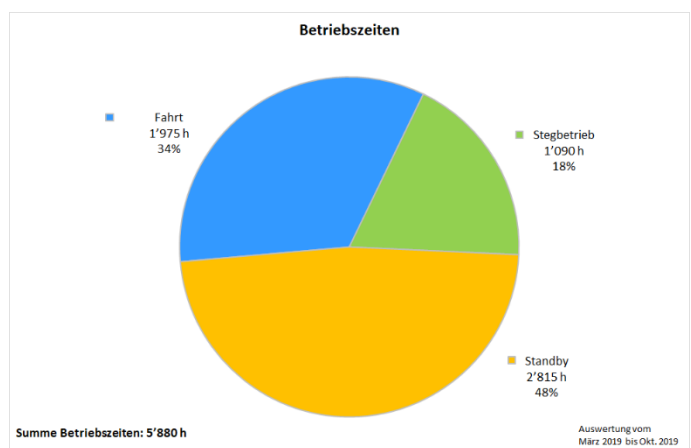


Abbildung 6 Aufteilung der Betriebsarten von März bis Okt.

#### 4.1 TREIBSTOFFVERBRAUCH

Im Treibstoffverbrauch wurde der gesamte Dieserverbrauch berücksichtigt und in Abbildung 7 pro Monat und in Abbildung 8 pro gefahrenem Kilometer dargestellt. Die Fahrstrecke zeigt nur geringe Monatsunterschiede von ca. 10 %. Der Treibstoffverbrauch ist wie erwartet proportional zur Fahrstrecke. Der durchschnittliche Dieserverbrauch pro km beträgt 4.76 Liter mit maximalen Unterschieden zwischen den Monaten von 4.6 %. Auffallend ist der Dieselbedarf vom Heizkessel in den Übergangsmonaten März, April, Mai, September und Oktober. In diesen milden Monaten sollte gemäss Planung die Wärme vollständig aus der Abwärme der Motoren erfolgen. Hier ist sicherlich noch Optimierungspotential bei der Steuerung/Regelung der gesamten HLK-Anlage vorhanden.

Zudem fallen die sehr hohen Anteile bei der Bordstromerzeugung auf. Diese setzen sich aus dem Verbrauchsanteil der Wellengeneratoren (Generator Hybrid) und den kleineren Anteilen der zusätzlichen Spitzenlastgeneratoren (Generator Diesel) zusammen. Verglichen zu einem kleineren Schiff der

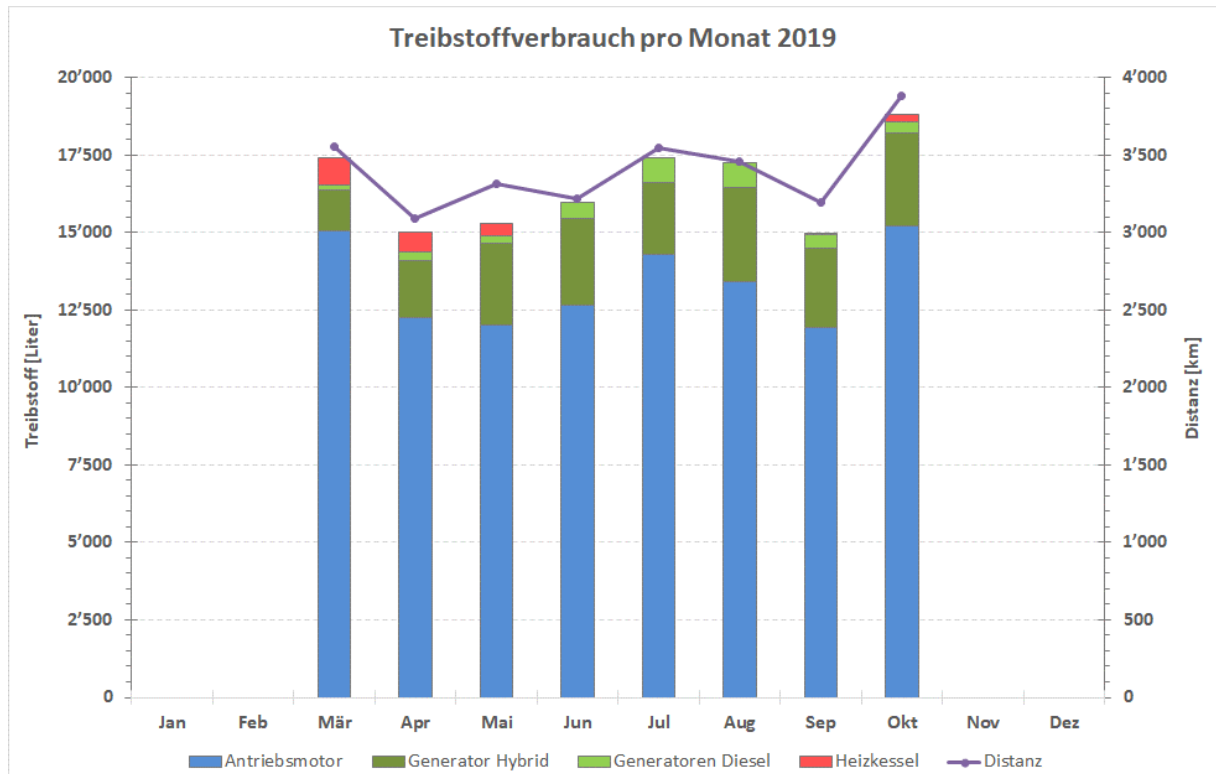


Abbildung 7: Gefahrene Strecke und Treibstoffverbrauch

Schiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees sind dies sehr grosse Anteile, was sich einerseits mit einem grossen Anteil an Komfortelektronik/-Elektrik (Bsp. Klimaanlage), wie auch der sehr grossen Eventküche zusammenhängt. Auffällig ist hier der prozentual hohe Anteil in den Monaten Mai bis und mit August. Dies sind einerseits die Monate mit den meisten Gastronomiefahrten, andererseits auch die Monate mit den höchsten Aussentemperaturen. Das schlägt sich insbesondere in den Monaten Juni bis August nieder, wo die durch die Spitzenlastgeneratoren, zusätzlich zu den Hybridgeneratoren erzeugte elektrische Energie höher ist als in den anderen Monaten.

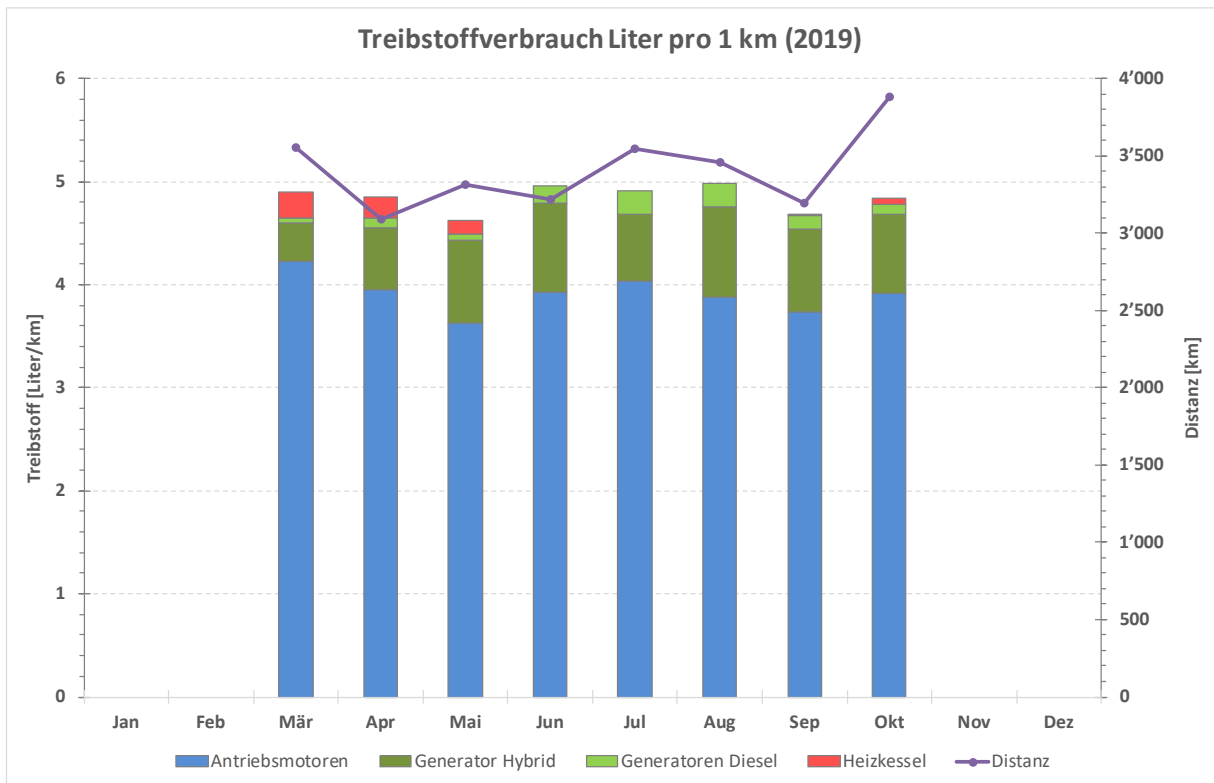


Abbildung 8: Gefahrene Strecke und Treibstoffverbrauch pro km

Von März 2019 bis Oktober 2019 wurde 132'158 Liter Diesel verbraucht wovon 80.8 % für den Antrieb benötigt wurden. Der restliche Dieselbedarf von 19.2 % wurde für die Stromerzeugung und zur Wärme-produktion mit dem Heizkessel benötigt. (Abbildung 9)

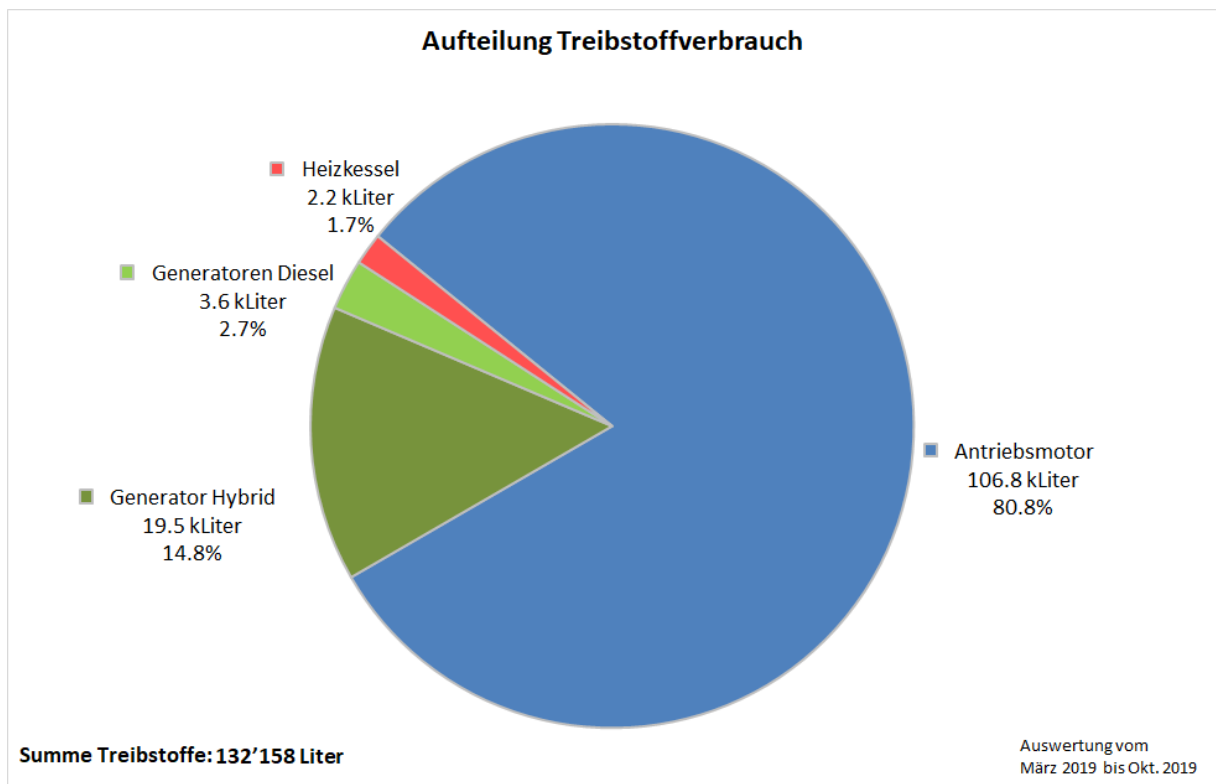


Abbildung 9 Aufteilung des Treibstoffverbrauchs

Werden nun die Daten verwendet um diese mit anderen Schiffen zu vergleichen, so kann und soll man gem. [5] einen Vergleich pro Tonne Schiffsgewicht oder pro möglichen Passagier gemacht werden.

Um dies zu machen, stehen langjährig durch die SGV ermittelte Verbrauchsdaten von verschiedenen Schiffen zur Verfügung. U.a. werden die vom MS Diamant komplett unterschiedlichen Schiffe wie MS Brunnen und MS Saphir, sowie die ähnlichen Schiffe MS Waldstätter und MS Europa herangezogen. Einige Kenngrößen dieser Schiffe sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

<b>Kenngrößen</b>	<b>Waldstätter</b>	<b>Europa</b>	<b>Brunnen</b>	<b>Saphir</b>	<b>Diamant</b>
Leergewicht [T]	260.0	244	197	107.5	345
Gewicht Betriebsklar [T]	277.3	296.4	207.9	114.6	371.3
Passgiere [-]	700	700	400	300	1100
Fahrleistung [km]	39'433	16'380	21'151	23'526	40'892
Beheizte Bodenfläche [m2]	485	435	322.9	120.6	840
Reisegeschwindigkeit [km/h]	25	24	25	25	25

*Tabelle 1: Vergleichswerte SGV Schiffe*

Werden nun die Daten miteinander verglichen, können die folgenden Vergleiche angestellt werden wobei zu beachten ist, dass beim MS Diamant kein vollständiges Jahr mit Messdaten zur Verfügung steht. Deshalb wurden bei der Fahrleistung, dem Dieserverbrauch der Antriebsmotoren und Generatoren die Messwerte auf zwölf Monate hochgerechnet. Wird dieser Vergleich angestellt und mit den Monatswerten, welche in [11] und [12] ausgewiesen werden verglichen, so kann gesagt werden, dass diese Annahme zumindest bezogen auf den Verbrauch für Antrieb und Erzeugung elektrischer Energie gut verwendet werden kann. Beim Heizölverbrauch des Kessels ist eine analoge Hochrechnung jedoch nicht anwendbar, da die vier Wintermonate andere Verbrauchszahlen haben als die gemessenen Monate. Deshalb ist der Dieserverbrauch beim Kessel in den Abbildung 10 bis Abbildung 12 mit einem Durchschnittsverbrauchswert von 2018 [12] ergänzt.

Der Treibstoffverbrauch ist beim MS Diamant im Vergleich pro Person und 100 km (Abbildung 10) sowie beim pro 100 km und Tonne (Abbildung 11) am tiefsten. Im absoluten Vergleich der Fahrleistung pro 100 km (Abbildung 12) ist der Dieserverbrauch grösser als bei den anderen Schiffen. Was wegen des massiv höheren Schiffsgewicht (Bsp. 32% grösser als MS Waldstätter) und Tragfähigkeit (Bsp. 57% grösser als MS Waldstätter) auch nachvollziehbar ist. Auffallend ist der absolut deutliche Mehrverbrauch der Generatoren. Dies lässt sich v.a. auf den schon oben erwähnten, massiv höheren Verbrauch an elektrischer Energie zurückführen. Siehe dazu auch die Ausführungen in Kapitel 4.2, welche einen Teil dieses Mehrverbrauchs begründen (Klimaanlage & grossen Eventküche).

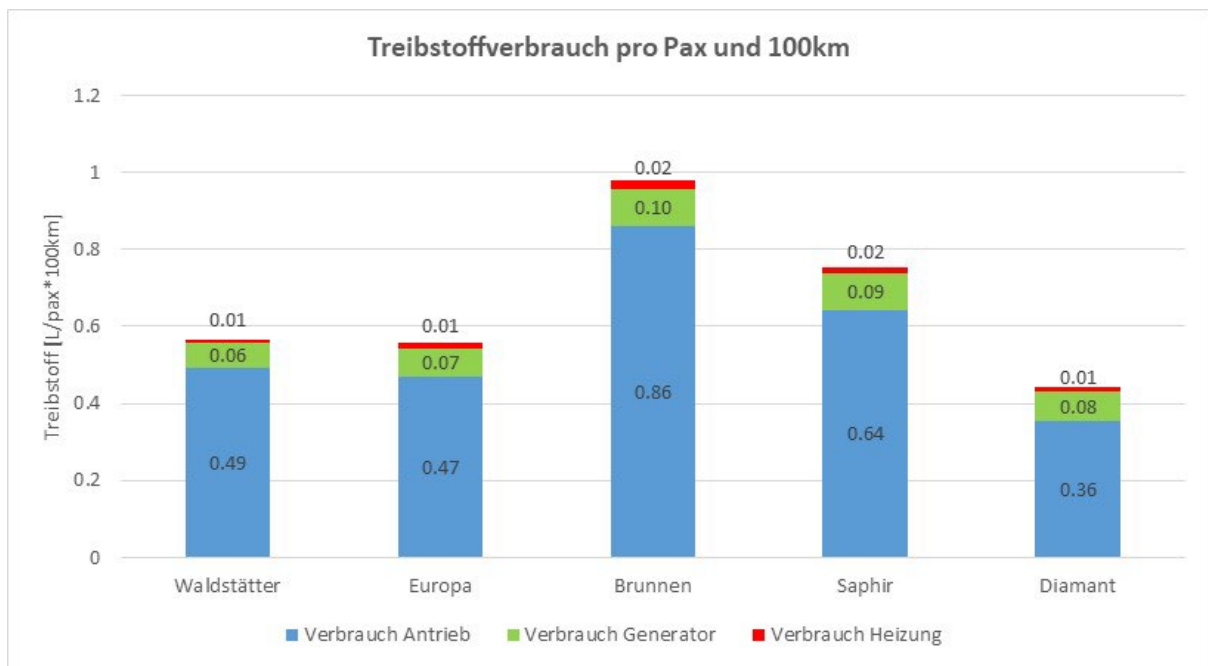


Abbildung 10: Vergleich Verbrauch pro Pax und 100km

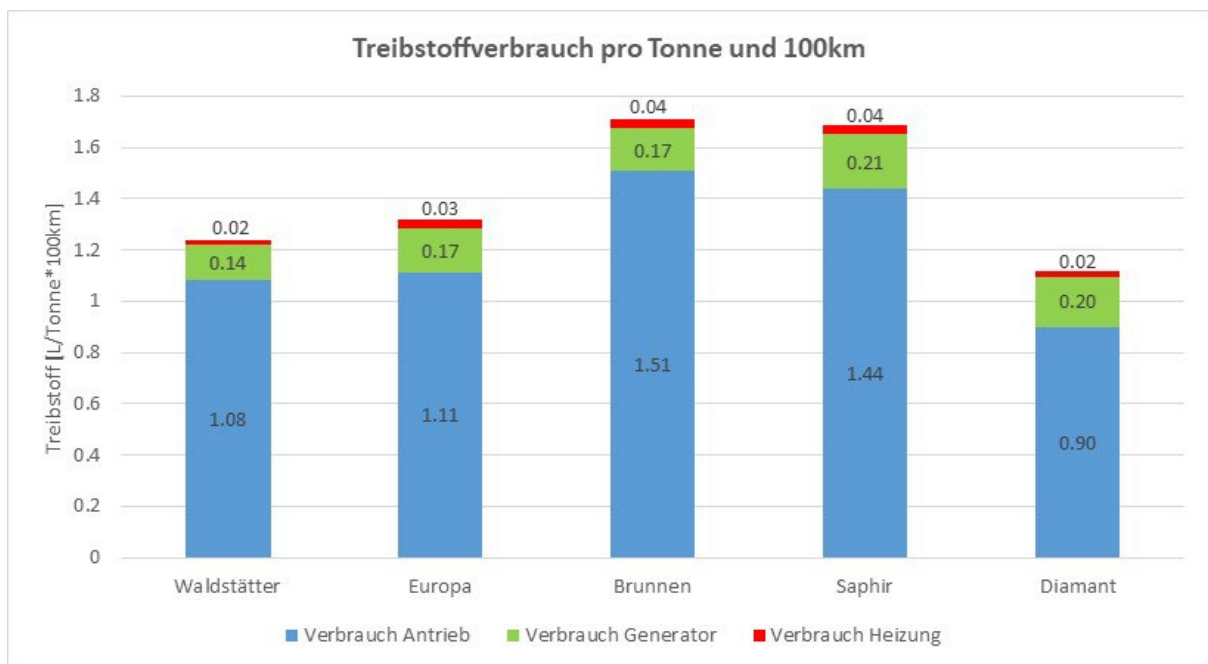


Abbildung 11: Vergleich Verbrauch pro Tonne und 100km

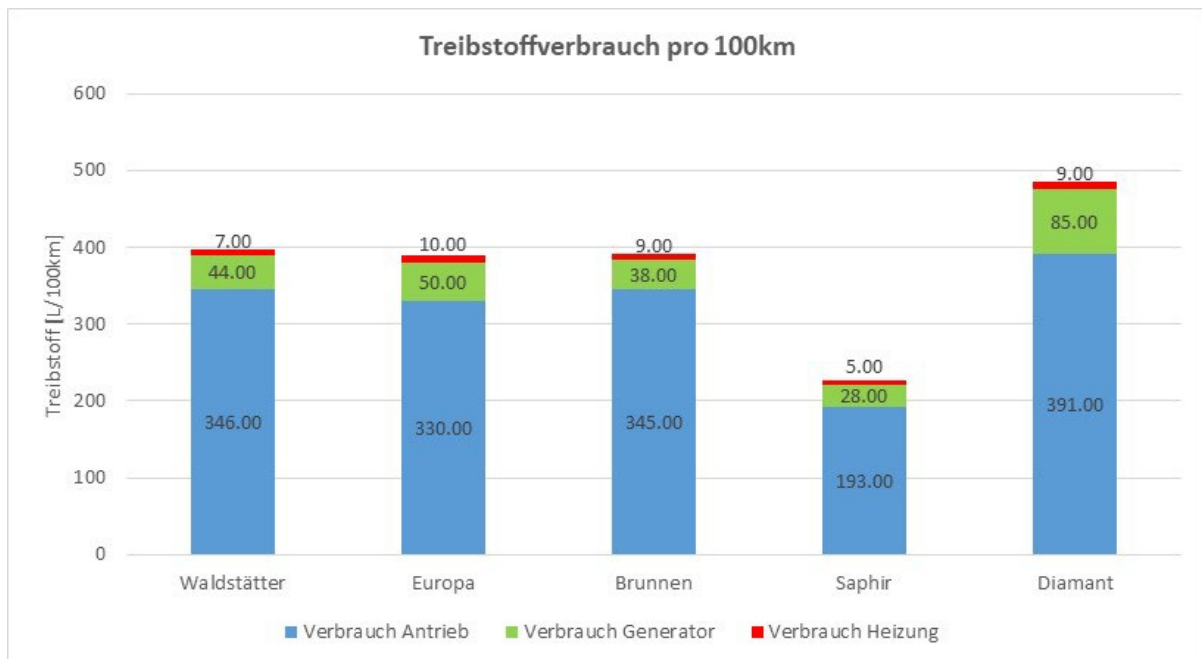


Abbildung 12: Vergleich Verbrauch auf 100km

Um die in Abbildung 10 bis Abbildung 12 aufgeführten Ergebnisse besser vergleichen zu können, lohnt es sich einen Relativvergleich bezogen auf die Zahlen des MS Diamant zu machen. In den folgenden Abbildung 14 und Abbildung 13 werden insbesondere die Mehrverbräuche von Antrieb und Erzeugung des elektrischen Bordnetz aufgeführt. Zusammen mit den totalen Mehrverbräuchen kann somit eine Bilanz über den effektiven Nutzen eines Hybridsystems gezogen werden. Zu beachten ist, dass wie oben schon erwähnt, der Bordnetzverbrauch des MS Diamant um einiges höher ist als der der anderen Schiffe.

Hier muss erwähnt werden, dass abgesehen vom Totalverbrauch, zur Beurteilung der Einzelverbräuche die unten in Abbildung 14 und Abbildung 13 aufgeführten Vergleichsarten separat betrachtet werden müssen. Einmal bezogen auf das Schiffsgewicht (für den Verbrauch des Antriebs) und einmal bezogen auf die Anzahl Pax (für das Bordnetz). Dies aufgrund der direkten Abhängigkeiten von Schiffsgewicht auf Schiffswiderstand, wie auch von Anzahl Passagieren auf die für Komfort aufzuwendende Energie. Trotzdem zeigt sich insbesondere beim Ansatz bezogen auf die Anzahl Passagiere, dass MS Diamant höhere Generatorverbräuche pro Passagier aufweist als die Vergleichsschiffe MS Waldstätter und MS Europa. Dies einerseits wegen des sicherlich grösseren Komfort-Verbrauchs, wie auch wegen des Einsatzes einer rein elektrischen Küche (verglichen mit MS Waldstätter und MS Europa mit Gasküchen) [5]. Dank der hohen Vernetztheit der Systeme und dem Peakshaving-Konzept des MS Diamant kann dies aber in der Betrachtung der Totalverbräuche wieder wettgemacht werden (trotz des massiv höheren Bordnetzbedarfs).



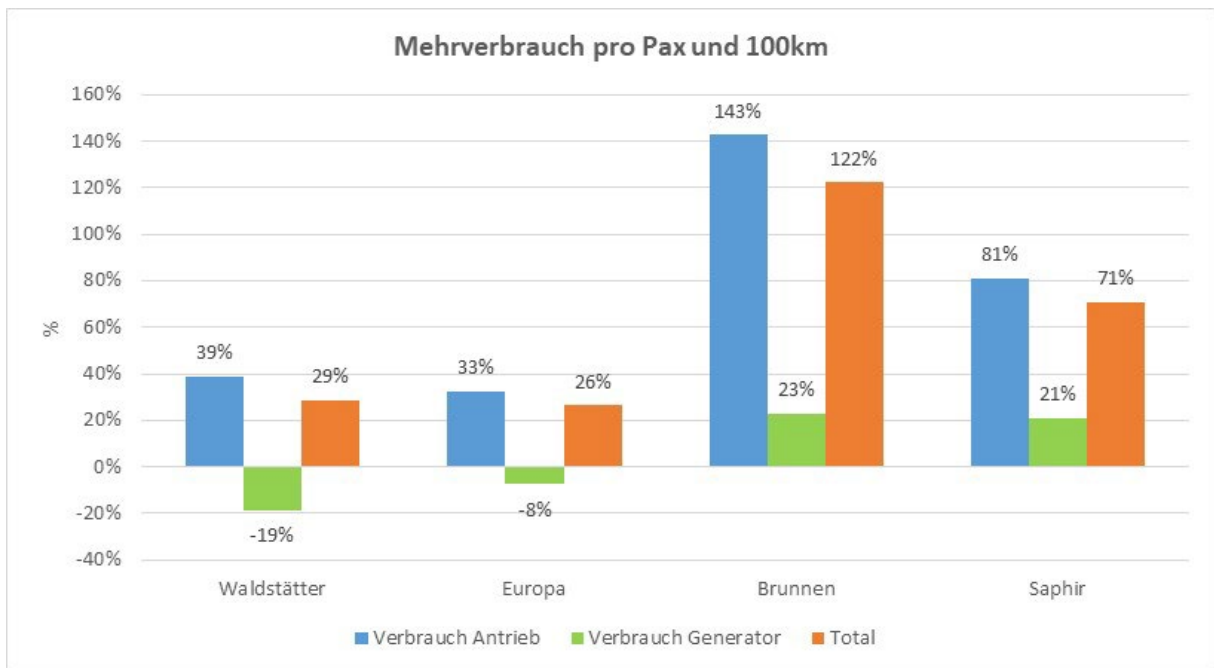


Abbildung 14: Mehrverbrauch der Vergleichsschiffe pro Pax und 100km

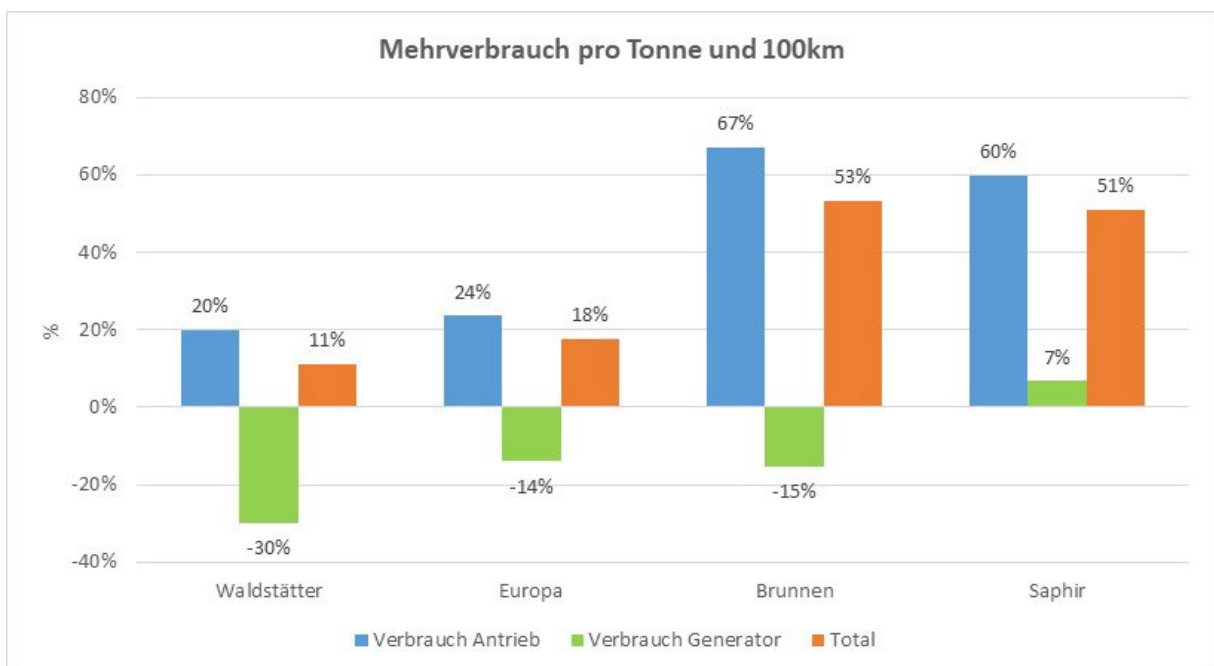


Abbildung 13: Mehrverbrauch der Vergleichsschiffe pro Tonne und 100km

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das in [1] und [5] ausgewiesene und mit Einzelmessungen nachgewiesene Potential für die Kraftstoff- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Grundsatz eingehalten werden kann. Grundsätzlich nicht ganz in der Grösse (bezogen auf den Verbrauch für den Antrieb pro Tonne Schiffsgewicht von ca. 20% verglichen mit ca. 25% in [1] und [5]), jedoch bestätigt durch Langzeitmessungen. Es zeigt sich, dass sich das Peak-Shaving-Konzept (Brechen der Beschleunigungslastspitzen der Antriebsdieselmotoren durch den aktiven Booster, Siehe [5]), wie auch das Downsizing der Antriebsdieselmotoren auszahlt. Zumal letzteres zudem den positiven Effekt mit sich bringt, dass die Wartungs- und Wiederbeschaffungskosten der Komponente Dieselmotor massiv tiefer ausfallen als bei einem konventionellen Antrieb. Hier kann heute von ca. zwei Drittel der vergleichbaren Kosten gesprochen werden!

Bezogen auf den Verbrauch für die Erzeugung von Bordnetzstrom kann gesagt werden, dass sich trotz des Komfortbedingten massiv höheren Bedarfs an elektrischer Energie auf MS Diamant v.a. verglichen mit MS Waldstätter (durchschnittlich plus 20-25%) der Mehrverbrauch an Diesel in Grenzen hält. Dank der oben schon erwähnten Vernetztheit der Systeme, sowie der Möglichkeit ca. 92% der

benötigten elektrischen Energie mit Hilfe der Hybridgeneratoren an den Antriebsmotoren (bei einem hohen Wirkungsgrad des Dieselmotors) oder auch mit Hilfe der Speicher, bzw. dem «Mitnehmen» von Landstrom abdecken zu können, kann die entsprechende Erzeugung unter Berücksichtigung von Verlusten an den Gleich- oder Wechselrichtern mehr oder weniger Verbrauchsneutral (im Vergleich zu MS Waldstätter) gestaltet werden. Zudem muss erwähnt werden, dass dank den sehr geringen Laufzeiten der Spitzenlastgeneratoren deren Wartungskosten ca. 90% unter den «normalen» Generatorwartungskosten ausfallen. Dies macht das Konzept für den Betreiber zusätzlich attraktiv.

Um aber den absolut höheren Energieverbrauch, bzw. Energiebedarf des MS Diamant besser analysieren zu können, können folgende weitere Aussagen gemacht werden:

## 4.2 ENERGIEBEDARF

Abbildung 15 zeigt die Energiebilanz der elektrischen Energie unterteilt in Einspeisung (als breite Säulen dargestellt) und Bezug der Verbraucher (als schmale Säulen dargestellt). In den Monaten März, April und Juli gab es Messunterbrüche mit der Folge, dass in diesen Monaten in der Bilanz zwischen Einspeisung und Verbrauch grosse Differenzen entstanden. Deshalb haben die beiden Säulen unterschiedliche Gesamtwerte. In den anderen Monaten sind die Abweichungen zwischen Einspeisung und Verbrauch zwischen 0.3 bis 0.9 %. Diese Abweichungen werden als Messungenauigkeit angenommen, da die verwendeten Messgeräte vom Hersteller nicht kalibriert sind. Als Bordnetz wurden alle unbekannten Verbraucher, welche aus der Summe aller Bezüge minus die Einzel gemessenen Werte berechnet wurden, zusammengefasst. Im Bordnetz ist auch der elektrische Energiebedarf der HLK-Anlagen (exkl. Kältemaschine) enthalten, da dieser nicht detailliert erfasst werden konnte. Auffällig ist der erhöhte Verbrauch in den Sommermonaten. In diesen Monaten wird zusätzlich elektrische Energie für die Kältemaschine und die Lüftungsanlage mit erhöhtem Volumenstrom benötigt.

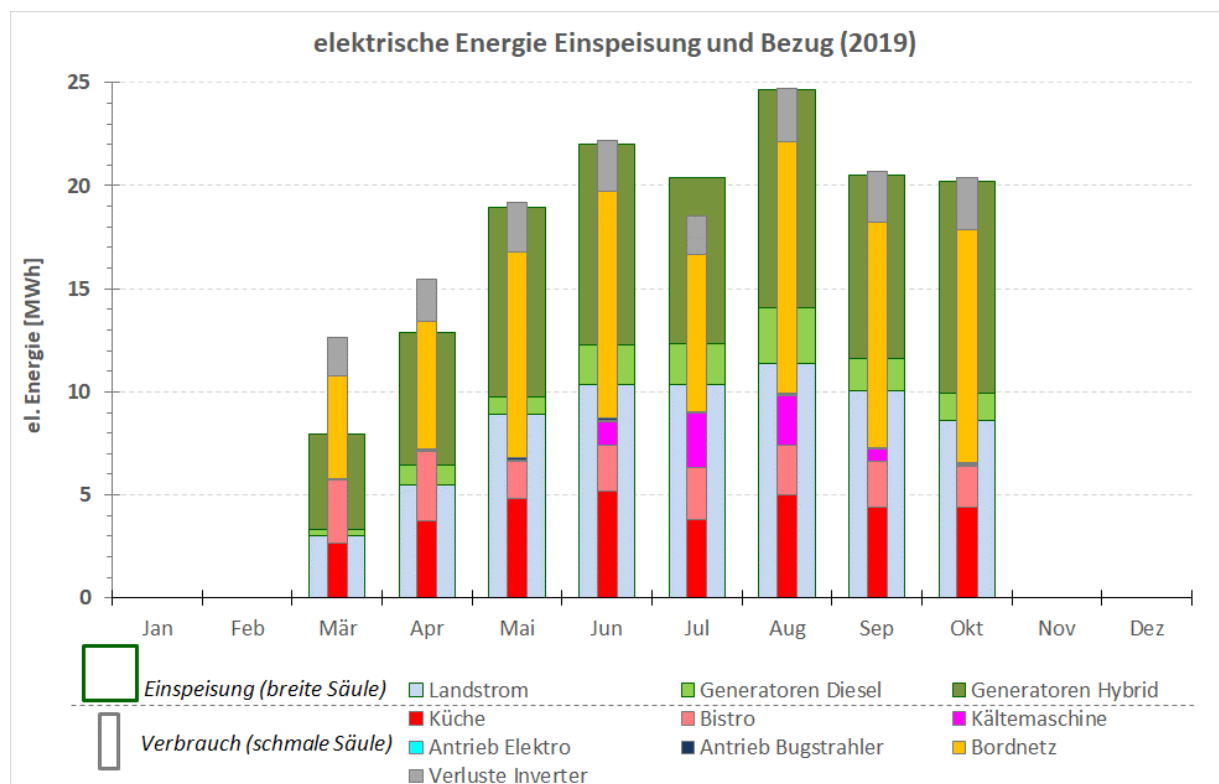


Abbildung 15: Energiebilanz elektrische Energie

In Abbildung 16 links ist die Aufteilung auf die elektrischen Verbraucher und rechts der Herkunft der elektrischen Energie für die Betrachtungsdauer von März bis Oktober 2019 dargestellt. Die Abweichung in der Summe Energiebezug zur Herkunft der elektrischen Energie ist mit den Messunterbrüchen in Teilsystemen während den Monaten März, April und Juli begründet. Neben dem Bordnetz, worüber keine detaillierteren Informationen verfügbar sind, ist der grösste Verbraucher die Gastronomie, welche mit Küche und Bistro zusammen 42 % benötigt. Die Verluste bei der Umwandlung von Gleichstrom zu Wechselstrom mit den drei Inverter I1 bis I3 (Abbildung 2) beträgt 12 %.

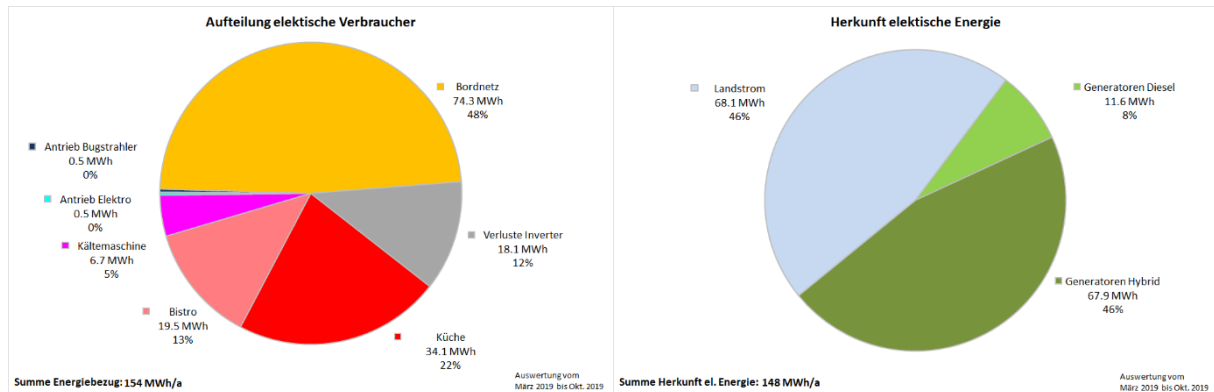


Abbildung 16: Aufteilung des Energiebedarfs und der Energiebereitstellung

Insbesondere Abbildung 15 und Abbildung 16 links zeigt auf, dass die Kältemaschine welche Basis für die Klimatisierung darstellt einen relativ kleinen Anteil am gesamten Stromverbrauchsmix von MS Diamant hat. Dies obwohl die Messzeit mehrheitlich im heissen Sommer 2019 liegt. Dies, und v.a. auch Feedbacks der Passagiere und Crew zeigt, dass bei einer sauberen Auslegung der Anlage auch mit geringem Energiebedarf ein Schiff der Grösse von MS Diamant klimatisiert werden kann (Bem. Shiptec: State of the Art Schiffe mit ähnlichem Einsatz und ähnlicher Grösse haben z.T. eine 4-5 mal grössere Kältemaschine an Bord). Auffällig (und sich mit der Erfahrung im laufenden Betrieb deckend) ist, dass sobald das Schiff gekühlt werden muss, sei es passiv durch Seewasser (siehe Abbildung 18) oder aktiv mit der Kältemaschine, der Bordnetzverbrauch ansteigt. Dies auf Grund einer höheren Auslastung der Lüftungsanlage, welche im Anteil «Bordnetz» enthalten ist.

Neben der Gastronomie, welche wie erwähnt einen sehr grossen Anteil an Bordnetzenergie benötigt, soll speziell im Zusammenhang mit dem bereits erwähnten KTI-Projekt «Energieeffizientes Fahrgastschiff» [6] der Anteil HLK analysiert werden. Insbesondere die Wärme- wie auch Kälteerzeugung und (wie oben bereits erwähnt) v.a. auch deren Verteilung ist hier zu beachten.

#### 4.3 ENERGIE HLK

54.6 MWh Wärme wurde in der Messperiode für die HLK bereitgestellt. Davon konnte 65% von den Motoren als Abwärme entnommen werden. Die restlichen 35 % produzierte der Heizkessel (Abbildung 17 rechts). Die Differenz zwischen Wärmebezug- und Abgabe wird mit Messunterbrüchen begründet. Das MS Diamant benötigt 44.3 MWh Wärme. Davon wurde 16 % (7,3 MWh) Energie zur Warmwasseraufbereitung verbraucht. Dies entspricht ca. einem Warmwasserverbrauch von 140 m<sup>3</sup> (580 L/Tag). Die Analyse der Kesselbetriebszeit im Monat Oktober ergab, dass der Kessel oft am Morgen vor dem Starten der Antriebsmotoren einschaltete, was im Grundsatz nicht den am Anfang gestellten Anforderungen an das HLK-System entspricht (der Heizkessel soll nur als Spitzenlastabdeckung funktionieren).

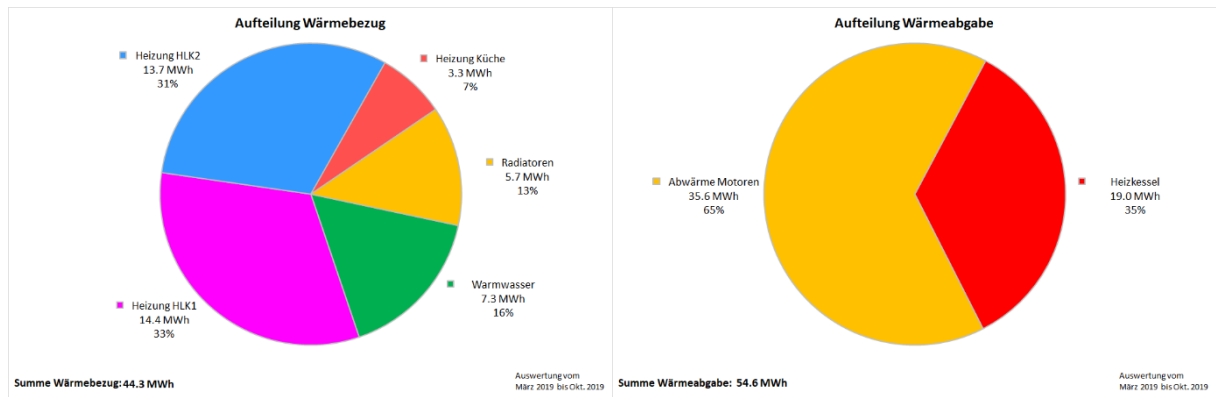


Abbildung 17: Aufteilung des Wärmebezugs und der Wärmeabgabe

Eine detaillierte Darstellung der Wärme- und Kälteenergie wird in Abbildung 18 im Vergleich mit der Aussenlufttemperatur und der Seewassertemperatur dargestellt. Auffallend ist der grosse Anteil der aktiven Kühlung in den Sommermonaten (mit Hilfe der Kältemaschine). Ohne aktive Kühlung kann vollständig passiv gekühlt werden solange die Seewassertemperatur tiefer als ca. 15 °C bleibt. Deshalb konnte das Schiff in den beiden Monaten Juli und August nur zu 11 % passiv gekühlt. Im Monat Juni war die passive Kühlenergie mit 30.6 MWh am grössten. Das Schiff wurde zu 42 % passiv gekühlt. In der Betrachtungsperiode von März bis Oktober benötigte die MS Diamant 39.4 MWh Kühlenergie wovon 77 % aktiv durch die Kältemaschine bereitgestellt wurden.

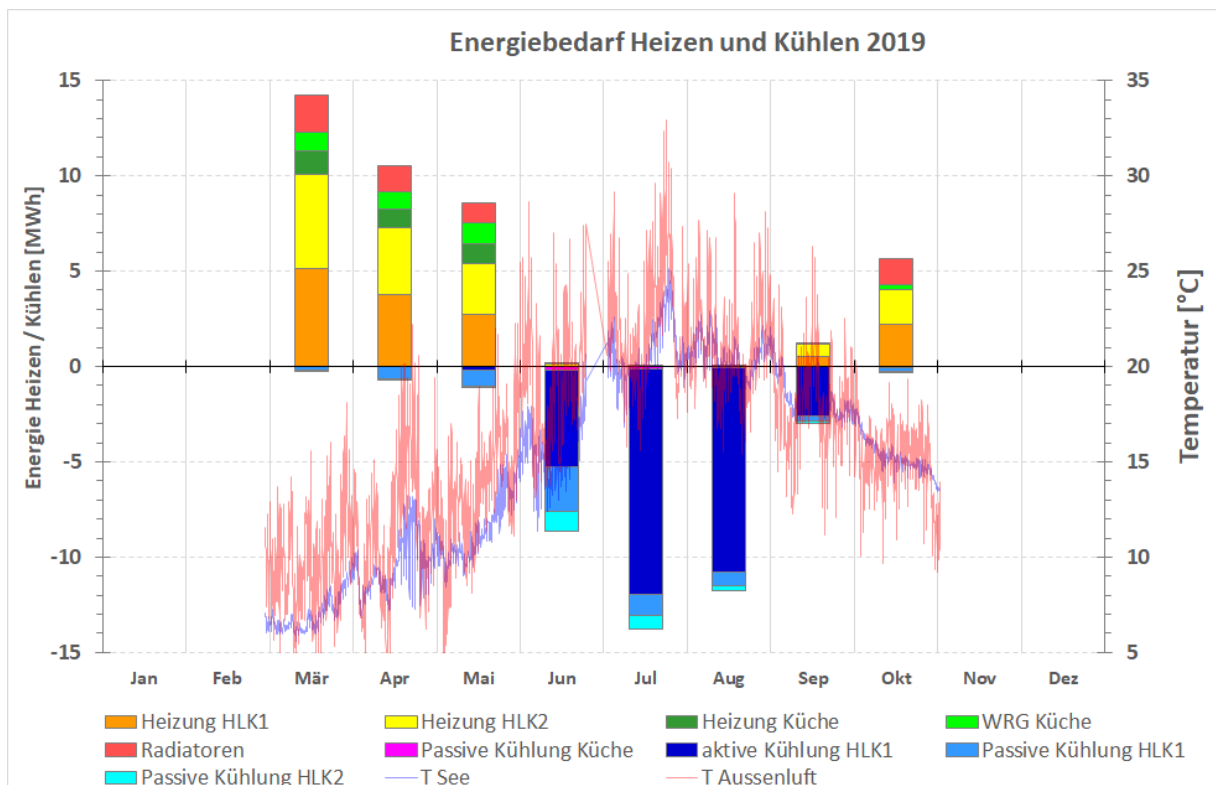


Abbildung 18: Aufteilung der Wärme- und Kälteenergie pro Monat

## 4.4 VERGLEICH MIT DER PLANUNG

### 4.4.1 Hybridantrieb

Um einen Vergleich mit den im Planungszeitraum 2014-15 erstellten Anforderungen an das System zu machen, müssen drei verschiedene messbare Faktoren herangezogen werden:

- a) Prognostizierte Verbrauchseinsparungen über alles und insbesondere beim Antrieb  
Hierfür können die Daten unter 4.1 herangezogen werden. Insbesondere die relativen Daten in Abbildung 13 und Abbildung 14. Diese können mit dem im Jahr 2014 durch die Klassifikationsgesellschaft DNVGL erstellten Konzeptvergleich [7] verglichen werden. Gem. diesem, der Gesamtauslegung und dem Systementscheid durch den Eigner zu Grunde liegenden Aussage, wird eine Verbrauchsreduktion im Kursbetrieb von ca. 13.5% prognostiziert ([7] S. 9). Werden nun diese Angaben mit den effektiven Einsparungen verglichen, kann gesagt werden, dass je nach Betrachtungsweise (sei es bezogen auf max. Pax oder Schiffsgewicht) die Erwartungen eingehalten, oder sogar übertroffen wurden. Da im Bericht von DNVGL kein zusätzlicher Energieverbrauch, verglichen mit einem bestehenden Schiff der SGV-Flotte berücksichtigt wurde, kann man sogar sagen, dass bezogen auf den effektiven Verbrauch der Antriebsanlage die Erwartungen um > 7% (plus) übertroffen wurden (durchschnittlich ca. 23.6%). Wird in Betracht gezogen, dass das System beim MS Diamant erst eine, den effektiven Messdaten zu Grunde liegende Systemoptimierungsrunde erfahren hat, so kann von weiterem Optimierungspotential ausgegangen werden.
- b) Zuverlässige (verbrauchsmindernde) Funktion des Systems  
Eine kontinuierliche, hochdynamische Messdatenerfassung des gesamten, hybriden Systems (inkl. Leistungsflüssen, Drehzahlen, dynamischem Verhalten) gem. Beschreibung im Zwischenbericht 2b [1] zeigt, dass das System wie in [1] beschrieben, zuverlässig funktioniert. Die entsprechenden Funktionen konnten im Rahmen einer ersten Optimierungsrunde im Frühjahr 2018 (nach Behebung der Havarieschäden vom Dez. 2017) soweit optimiert werden, dass die unter 4.1 aufgeführten Resultate im Treibstoffverbrauch erzielt wurden. Diese kontinuierliche Messdatenerfassung konnte zudem auf zwei weitere, im Nachgang zu MS Diamant ausgerüstete Schiffe ausgedehnt werden. Gemeinsam mit diesen zusätzlichen Daten kann ein kontinuierliches Monitoring der Systeme (als Basis für Systemverbesserungen) gewährleistet werden. Shiptec AG arbeitet momentan daran, diese Datenerfassung und v.a. dessen Auswertung zu automatisieren.
- c) Sichere Funktion aller Systeme in allen Betriebszuständen  
Im Rahmen einer generellen Systemüberprüfung durch einen unabhängigen Dritten konnte die Sicherheit in allen Betriebszuständen, inkl. Mehrfachredundanzen gem. dem vorliegenden Sicherheitskonzept von 2014 [13] und 2019 [14] nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang wird auf den Bericht des unabhängigen Sachverständigen verwiesen [8].

Wie bereits im Zwischenbericht 1 [3] erwähnt, konnte im Rahmen des Projektes ein ausführliches Mess- und Simulationstool entwickelt werden. Dieses ist seit dem Umsetzen der Systeme auf MS Diamant bereits schon diverse Male zur Auslegung und Entwicklung von hybriden Antriebs- und Energiesystemen verwendet worden. In diesem Zusammenhang kann die relativ hohe Genauigkeit von Prognosen einerseits zur Auslegung von Systemen und andererseits zur potentiellen Treibstoffeinsparung erwähnt werden. Diese übertrifft die Berechnung welche [7] zu Grunde liegt bei weitem. Wegen der Entwicklung dieses Tools im Rahmen und mit Hilfe von Daten aus dem Projekt 050 Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff können hier keine direkten Vergleiche in Bezug auf MS Diamant herangezogen werden. Exemplarisch sollen aber Daten aus der Auslegung des MS Bürgenstock (SGV 2018) die Effektivität der Simulation darstellen. Siehe dazu Abbildung 19 und Abbildung 20.

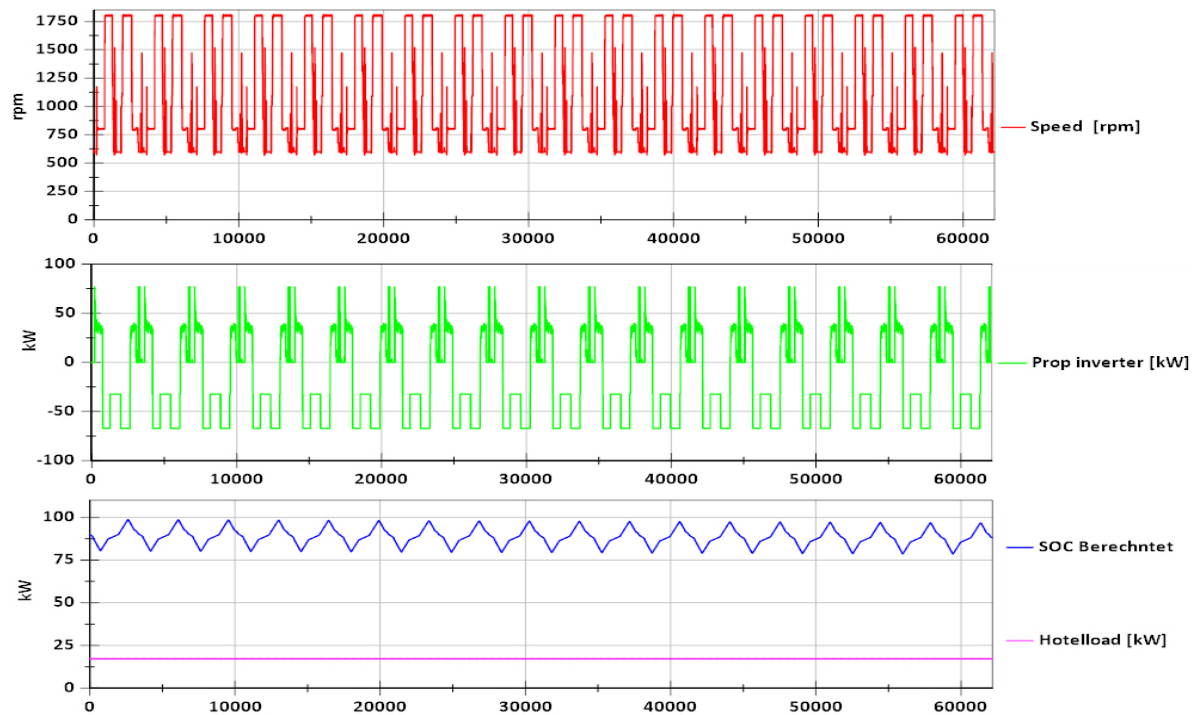


Abbildung 19: Simulationsergebnisse für Fahrplan MS Bürgenstock (ein Tag)

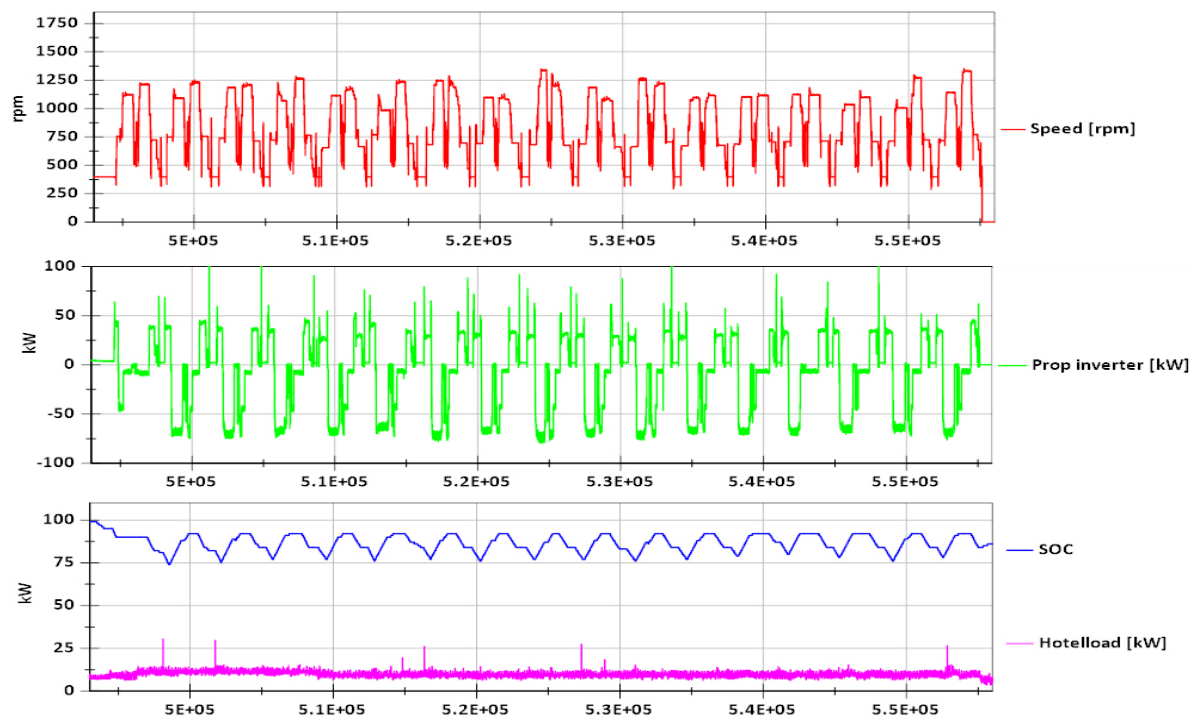


Abbildung 20: Messergebnisse für Fahrplan MS Bürgenstock (ein Tag)

Wie Abbildung 19 und Abbildung 20 zu entnehmen ist, stimmen die Resultate der Simulation relativ gut mit den effektiven Messdaten überein. Wie die Grafiken zeigen und wie auch die Erfahrung aus bis anhin vier simulierten und auch umgesetzten Systemen zeigen, können heute, dank diesem Simulationstool kombiniert mit neuster Messtechnik, Voraussagen im Bereich  $\pm 2\text{-}3\%$  bzgl. des zu erwartenden Verbrauchs gemacht werden. Das Vermessen eines bestehenden Schiffes mit konventioneller Antriebs- und Energietechnik, in gleichem oder ähnlichem Betrieb (kombiniert mit schiffbautechnischen Prognosedaten zum zukünftigen Schiffswiderstand) vorausgesetzt. Siehe dazu auch die Ausführungen in [5] und [2].

#### 4.4.2 Bordnetz und HLK

Die Berechnungen der Heiz- und Kühlenergie basierend auf den Simulationen der Hochschule Luzern sowie die Energiewerte der Messungen von März 2019 bis Oktober 2019 sind in Tabelle 2 aufgeführt. Da noch keine vollständige Heizperiode gemessen und ausgewertet werden konnte, können diese Angaben nicht verglichen werden. Dieser Vergleich kann erst nach Abschluss einer vollständigen Heizperiode gemacht werden. Im Sommer 2019 konnte eine vollständige Kühlperiode mit kleinen Messunterbrüchen im Juli gemessen und verglichen werden. Die Messungen im «Hitzesommer 2019» (der deutlich wärmer war als der langjährige Mittelwert) ergaben ein um 18 % höheren Nutzenergiebedarf an Kälteenergie als in der Planung. Der Energiebedarf der aktiven Kühlung zeigt in den Messungen ein um den Faktor 3.2 grösseren Bedarf, womit der Anteil der passiven Kühlung viel zu gering ausfällt. Ob die höheren Wassertemperaturen, welche im langjährigen Mittel in der Planung maximal 21 °C (4 °C tiefer als im 2019) erreichten, die Hauptursache der Abweichung war konnte noch nicht geklärt werden. Der Energiebedarf der Gastronomie mit Küche und den beiden Bistros wurde von den 8 verfügbaren Monaten auf ein Jahr extrapoliert. Die Messung ergab ein um 20 % geringeren Bedarf als die Planung.

	Planung [MWh]	Messung 2019 [MWh]	Abweichung [-]
Nutzenergiebedarf Heizen	177	Messperiode zu kurz	
Nutzenergiebedarf Kühlung	33.5	39.4	18%
Energiebedarf Kessel	29.5	Messperiode zu kurz	
Energiebedarf aktive Kühlung	7.2	30.4	322%
Energiebedarf Küche (inkl. Bistros)	100	80 (extrapoliert)	-20 %

Tabelle 2: Vergleich Planung und Messung des Energiebedarfs der HLK

#### 4.5 WARTUNG UND KOMPONENTENSTANDZEITEN

Bei der Auswahl der Komponenten im System, wurden neben dem Einhalten der Grundspezifikationen auch ein Augenmerk auf Wartungsintervalle und Komponentenstandzeiten gelegt. Einerseits in Bezug auf die vom Komponentenhersteller genannten Informationen, andererseits aber auch in Bezug auf eine möglichst optimale Integration, respektive Auslastung der Komponenten. Neben den bekannten Werten bei Dieselmotoren, Getrieben, usw., welche hier nicht speziell behandelt werden, wurde der Fokus auf elektrische Komponenten, - Maschinen und Batterien gelegt. Für diese Komponenten können folgende Aussagen zu Wartungs- und Komponentenlaufzeiten angegeben werden:

Komponente	Wartung(intervalle)	Lebensdauer	Bedingungen
Wechsel- und Gleichrichter	Prüfung von Funktion und Signalen alle 20'000h	Keine Angaben Erfahrung zeigt > 30'000h	Einhalten der Spannungs-/Stromgrenzen, Einbau/Kühlung gem. Spezifikation
Elektrische Maschinen	Lagerprüfung alle 20'000h	Keine Angaben, je nach Ergebnis der Prüfung. Erfahrung zeigt > 30'000h	Einhaltung der Drehzahlgrenzen und Einbau/Kühlung gem. Spezifikation
Batterie (LiFePO4)	1-mal im Jahr Sichtprüfung	8 Jahre bei 20% Kapazitätsverlust, 10 Jahre bei 30% Kapazitätsverlust	Einhalten der Lade- und Entladeraten (C-Raten), Einhalten der Betriebstemperaturen, Einhalten der für die Kalkulation angesetzten Tiefentlade-Grenzen

Tabelle 3: Wartungsintervalle und Standzeiten

Verglichen mit Wartungs- und Standzeiten von konventionellen Dieselmotoren und Getrieben von ca. 15'000h «time to overhaul» und ca. 25'000h bis zum Lebensende, sind die Zeiten für die speziellen Komponenten als länger zu betrachten. D.h. in einer weiteren Vergleichsbetrachtung müssten die entsprechenden Kosten für einen Ersatz als «positiver» für das Hybridsystem im Vergleich zu einem konventionellen System betrachtet werden. Diese Tatsache wird aber der Einfachheit halber und wegen des geringen Einflusses auf eine Gesamtbetrachtung nicht weiter behandelt.

Beim Spezialfall «Batterie» lohnt es sich aber die Bedingungen für die Einhaltung der geplanten Standzeiten separat zu betrachten. Hier kann gesagt werden:

- Die Batterie als gesamtes muss so ausgelegt werden, dass definierte Ladezyklen, respektive Genz-SOC<sup>1</sup> eingehalten werden.
- Das System als gesamtes muss so ausgelegt werden, dass nur definierte C-Raten<sup>2</sup> für Laden und Entladen eingehalten werden.
- Speziell bei Luft gekühlten Batterien müssen die spezifizierten min. und max. Umgebungstemperaturen eingehalten werden.

Werden diese drei Bedingungen eingehalten und für eine Lebensdauerberechnung mit einbezogen, kann davon ausgegangen werden, dass die prognostizierten Lebensdauern auch eingehalten werden können. Entsprechende Degenerationerscheinungen konnten nach 4 Jahren Einsatzdauer auf MS Diamant nicht betrachtet werden, was positiv stimmt, dass die berechneten Werte auch eingehalten werden.

Vor diesem Hintergrund kann gesagt werden, dass das System einerseits die Erwartung bzgl. Wartungsintensität, wie auch Lebensdauer erfüllt hat. Insbesondere bei den Batterien zeigt sich, dass diese allenfalls sogar übertroffen werden können.

#### 4.6 WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG

Wie bereits im Projektantrag [4] formuliert, muss bei diesem ersten hybriden Energie- und Antriebssystem von Mehrkosten von ca. CHF 1'043'900.- ausgegangen werden (verglichen zu einem konventionellen Antriebs- und Bordnetzaufbereitungssystem). Die im Antrag ausgewiesenen Kosten haben sich im Laufe des Projektes so bestätigt. Dies ist nicht verwunderlich, da zum Zeitpunkt des Formulierens des Projektbeschriebs schon einige Arbeiten und v.a. sämtliche Konzepte und Komponenten bekannt, respektive abschlossen waren. Werden diese Mehrkosten in verschiedene Gruppen aufgeteilt, zeigt sich folgendes Bild:

Einmalige Basisentwicklungskosten:	CHF 392'500.-
(wiederverwendbar bei nächsten Projekten)	
Einmalige Kosten für Monitoring (Projektspezifisch):	CHF 85'000.-
Effektive Mehrkosten	CHF 566'400.-

Davon ausgehend, dass die Kosten für die Entwicklung des/der System/e bei 90% als einmalig betrachtet werden können, muss von ca. CHF 39'250.- spezifischen Kosten (wiederholend, beim nächsten System) ausgegangen werden. D.h., dass alles in allem die Mehrkosten für ein hybrides Energie- und Antriebssystem bei ca. CHF 605'650.- zu liegen kommen. Werden nun diese, bereits im Rahmen von ähnlich grossen Folgesystemen (z.Bsp. MS Waldstätter oder MS Bürgenstock), bestätigten Kosten als Basis für eine Amortisationsrechnung angesetzt, ergibt sich für den Fall des Pilotschiffes (MS Diamant) folgendes Bild auf der nächsten Seite:

<sup>1</sup> SOC: State of Charge (Ladezustand)

<sup>2</sup> C-Rate: Max. mögliche Lade- und Entladeleistung im Verhältnis zur Batteriekapazität



Mittlere Einsparung verglichen mit MS Waldstätter und MS Europa	23.6%	Normiert auf Schiffsgewicht und Pax Anzahl
Gemessener Verbrauch im 2019	4.92 L/km	gemittelt über alle Fahrten, Statistik SGV
Absolut Einsparung	1.162 L/km	
Jährliche Einsparung	45'181 L	Bei einer ausgewiesenen Kilometerleistung von 38'882 km/Jahr
Jährliche Kosteneinsparung (bezogen auf Treibstoff)	CHF 44'336.-	Basis durchschnittlicher Dieselpreis 2018-2019: CHF 1.74 minus Treibstoffzoll (Konzessionierte Schifffahrtsgesellschaften sind Zollbefreit): CHF 0.7587
Jährliche Einsparungen wegen kleineren Hauptmaschinen (Downsizing)	CHF 27'857.-	Basis TCO-Kalkulationen MAN D2862 LE431 (V12) vs. Scania DI13 070M (R6) auf 12 Jahre
Jährliche Einsparungen bei Generator (fast kein Einsatz)	CHF 19'200.-	Basis TCO-Sisu 66CTIM (350h/y vs. 2400h/y) Auf 12 Jahre
Jährliche Totaleinsparung	CHF 91'393.-	
Amortisation der Mehrinvestition:	6.62 Jahre	Bei CHF 605'650.- Mehr-Investition (verglichen mit einer konventionellen Anlage)

Wird die durchschnittliche Amortisationszeit einer konventionellen Antriebsanlage von ca. 12 Jahren angesetzt, kann gesagt werden, dass sich ab ca. der Hälfte der Laufzeit die Kosten bezahlt gemacht haben wobei davon ausgegangen werden muss, dass die Batterien nach ca. 10 Jahren nur noch 70% ihrer ursprünglichen Kapazität haben. Da im Falle von MS Diamant die Batterien schon heute nur in einem Range von 50-90% SOC betrieben werden, kann davon ausgegangen werden, dass der Ersatz erst mit dem Ersatz der Antriebsanlage (nach den oben erwähnten 12 Jahren) gemacht werden muss<sup>3</sup>.

Die Erfahrung in Bezug auf die inzwischen weiter umgesetzten Projekte zeigt jedoch, dass diese Wirtschaftlichkeitsrechnung sehr stark vom Schiffstyp, wie auch vom Einsatz des Schiffes abhängt. So hat es sich z.B. gezeigt, dass das fast identische System auf MS Bürgenstock eine bedeutend geringere Amortisationszeit aufweist. Dies ist einerseits der massiv höheren Kilometerleistung, wie auch des leicht anderen Einsatzes geschuldet. So verkehrt MS Bürgenstock ca. ½ der Fahrzeit im rein elektrischen Modus, was nicht nur das Potential eines parallel hybriden Energie- und Antriebssystems voll ausnützt, sondern auch die Laufzeiten der Hauptdieselmotoren um die Hälfte reduziert. Was wiederum neben den Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch auch die TCO-Basierten Kosten massiv reduziert. Hier gehen dies Amortisationszeiten in die Richtung von ca. 3.2 Jahren.

Unter diesem Gesichtspunkt kann gesagt werden, dass sich hybride Systeme lohnen. Zudem kann auch gesagt werden, dass das diesbezügliche (wirtschaftliche) Potential für eklektische Antriebe vielversprechend ist.

<sup>3</sup> Diese Betrachtung bezieht sich auf den Einsatz gem. MS Diamant und MS Waldstätter (2. Schiff mit ähnlichem Konzept). Betrachtungen bei MS Bürgenstock können ähnlich aber mit anderen Ausgangsparametern angestellt werden.

## 5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Abschliessend, auf Basis der nun vorliegenden Langzeitmessergebnissen und unter Einbezug der Erkenntnisse und Beschreibungen in den Zwischenberichten 1 bis 2b [1] [2] [3] sowie unter zu Hilfenahme des als Zusammenfassung des Projektes im Herbst 2017 publizierten wissenschaftlichen Papers «Hybrid energy- and propulsion system for vessels in timetable operation» [5], kann gesagt werden, dass das im Projekt erarbeitete hybride Energie- und Antriebssystem für ein Fahrgastschiff sehr gut und zufriedenstellend funktioniert.

Die nun vorliegenden Ergebnisse zeigen aber auch weiter vorhandenes Optimierungspotential auf, welches in der nächsten Zeit (Zeithorizont bis Ende 2020) ausgeschöpft werden soll. Dank der grossen Parametervariabilität der Systeme (Haupt- und Subsysteme) lassen sich ohne grosse Änderungen an der Hardware weitere Optimierungen umsetzen. Insbesondere betrifft dies:

- Die Optimierung des effektiven Peakshaving-Konzepts, d.h. v.a. den Einsatz des Boosters sowie des Wellengenerators an den beiden Hauptantriebsmaschinen. Hier sollen v.a. die Grenzen der elektrischen Maschinen und der vorhandenen max. Batterie Lade- und Entladeströme neu und optimaler gesetzt werden, was eine bessere Dynamik und auch effizienteres Peakshaving erlaubt (in Anlehnung an die letzte Version des Systems auf MS Waldstätter umgerüstet im Frühling 2019). Zu diesem Zweck werden die hier beschriebenen Messungen und Auswertungen auf dem Schiff weitergeführt und kontinuierlich zur Verbesserung/Optimierung des Systems eingesetzt. Mit dem Ziel, nicht nur das System des MS Diamant weiter zu bringen, sondern vielmehr auch wichtige Erkenntnisse für weitere Systeme/Systemauslegungen zu erlangen. Bis hin zum Zero-Emission-Ship.
- Die Wirtschaftliche Betrachtung des Projektes, respektive dessen Umsetzung sowie der folgende Betrieb hat gezeigt, dass Amortisationszeiten von ca. 6.5 Jahren für diesen Einsatz möglich sind. Dies ist bei zusätzlicher Beachtung der normalerweise langen, generellen Amortisationszeiten von Schiffen oder Schiffssystemen als kurz zu sehen. Zusätzlich kann gesagt werden, dass diese Amortisationszeiten je nach Einsatz des Systems, respektive des Schiffes massiv reduziert werden können (Erfahrung MS Bürgenstock).
- Die Optimierung des Batteriemanagementsystems, kombiniert mit weiterer Schulung der Crew. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass mit vorausschauender, «hybridspezifischer» Fahrweise (ähnlich dem PKW) Potentiale insbesondere im Zusammenhang mit dem Verbinden des Schiffes am Landstrom sowie der Fahrweise in den Langsamfahrtstrecken (Luzerner Seebecken) und auch bei hoher Geschwindigkeit ausgeschöpft werden können.
- Die automatische Erfassung und Auswertung von dynamischen und nicht dynamischen Betriebszuständen, sowie deren Zuhilfenahme für zukünftige selbstlernende Anteile bei einer Überarbeitung der Regelungssoftware. Zudem können diese automatisch erfassten und ausgewerteten Daten zurück in das sich ständig mit Erfahrung erweiternde Simulationstool fliessen sowie die Grundlage für diverse predictive basierende Wartungsarbeiten sein.

Neben den eigentlichen Optimierungen im Bereich des hybriden Energie- und Antriebssystem haben die vorliegenden Messdaten aufgezeigt, dass im Bereich Komfort-Elektrik und HLK diverse Optimierungsarbeiten notwendig sind. Dies betrifft insbesondere die folgenden Bereiche:

- Die Regelung der Heizung, bzw. v.a. des Aufheizens des Schiffes am Morgen vor dem eigentlichen Betrieb. Hier haben die Messdaten gezeigt, dass wegen einer falschen Regelung, bzw. einer falschen Bedienung zu schnell und zu intensiv (bei entsetzenden Verlusten) aufgeheizt wird. Dies kann durch eine bessere Einstellung und Schulung optimiert werden.
- Die aktive, bzw. passive Kühlung. Hier haben die Messdaten gezeigt, dass gegenüber der Prognose zu viel Energie in die aktive Kühlung durch die Kältemaschine fliesst. Der genaue Umstand, warum dies entgegen der Erwartungen so ist, muss im Sommer 2020 nochmals untersucht werden. Es ist aber anzunehmen, dass hier auch eine Parameteroptimierung (z.B. Einschaltbedingungen der Kältemaschine) Abhilfe schaffen könnte. Zudem muss der Leistungsbedarf der eigentlichen Lüftung, bzw. Lüftungsmaschine untersucht werden. Da die elektrische Leistung der Lüftungsmaschinen einen grossen Anteil am Bordstromverbrauch hat, muss hier sicherlich auch genau hingeschaut werden.

Neben dem eigentlichen Betrieb des Pilotschiffes MS Diamant sind die grössten Outcomes aus dem Projekt 050 «Hybrides Energie- und Antriebssystem für ein Fahrgastschiff», die nun vorliegenden Erfahrungen bei der Auslegung solch komplexer Systeme. Hierbei kann und muss sicherlich die vorgängige Simulation der Systeme erwähnt werden. Nur dank dieser zuverlässigen Methode, welche im Normalfall immer auf real gemessenen Daten von gleichen oder ähnlichen Schiffen sowie gleichen oder ähnlichen Betriebsarten basiert, lässt sich ein Downsizing der relevanten Komponenten bei geringem Auslegungsrisiko bewerkstelligen. Erst damit lässt sich das bei MS Diamant erzielte Potential ausschöpfen. Das betrifft insbesondere den Bereich wo Leistungselektronikwirkungsgrade mit in die Auslegung hineinspielen. Hier entscheiden die genauen Vorkenntnisse über Erfolg oder Misserfolg eines Projektes. Insgesamt lassen sich folgende Empfehlung für eine erfolgreiche Auslegung zusammenfassen:

- a) Eine exakte Kenntnis über alle zukünftigen Verbraucher ist dringend notwendig. Dies auch unter Betrachtung dynamischer Änderungen im Betrieb.
- b) Die Antriebs- und Fahrplanmodi für das Schiff müssen bekannt sein. Je genauer und spezifischer der Einsatz definiert ist, desto besser kann entsprechend dem Einsatz optimiert werden. Dies insbesondere in Bezug auf die Betrachtung der potentiell vorhandenen Leistungselektronikwirkungsgrade.
- c) Nur wenn a) und b) erfüllt sind, inkl. der Kombination mit einer Simulation des Betriebes ist eine optimale Auslegung möglich. Dies betrifft nicht nur einen «hybriden» Betrieb, sondern auch die «Steigerungsform» elektrisch wie auch Wasserstoffhybrid (siehe [9]). Nur in diesem Fall sind auch Punkte wie Komponenten Downsizing oder auch Peakshaving effizient und sinnvoll möglich.
- d) Das Grundsystem bietet bei ähnlicher Systemarchitektur verschiedene Möglichkeiten in der eigentlichen Operation. Dies reduziert Risiken bei der Komponentenauswahl (bekannte Komponenten) und ermöglicht grosse, individuelle Anpassung aller Parameter (siehe verschiedene Betriebe von MS Diamant und MS Bürgenstock bei fast gleicher Architektur).
- e) Die angesprochene Simulation ist nicht nur die Grundlage zur Optimierung und Risikominimierung, vielmehr ist sie auch als Entscheidungsgrundlage für ein Projekt Go oder No-Go unverzichtbar. Sie ermöglicht die Wirksamkeit von Massnahmen zu quantifizieren und Payback-Zeiten für den Eigner zu beziffern.
- f) Die Punkte a) bis e) wurden seit dem Projekt auf MS Diamant bereits an drei weiteren Schiffen umgesetzt. Die erzielten Ergebnisse in der Realität zeigen die Wirksamkeit der entwickelten Werkzeuge. Vier weitere Schiffe wurden zudem bereits prognostiziert und warten auf die entsprechende Projektumsetzung. Bei allen sieben Auslegungen wurden neben dem parallelhybriden Konzept die serielle Variante mitbetrachtet und z.T. empfohlen/umgesetzt. Zudem wurden auch alle Systeme inkl. der im MS Diamant umgesetzten Philosophie des Powermanagements sowie des Heavy-Consumer-Request, bzw. – shut-off [1] berücksichtigt und z.T. (wo sinnvoll) umgesetzt. Dies zeigt einerseits die Tauglichkeit der erarbeiteten Werkzeuge, wie auch den Erfolg der entsprechenden Konzepte.

## 5.1 WISSENSTRANSFER

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Projekt 050, dessen Umsetzung und Kommunikation einen enormen Schub im Schweizer (und internationalen) Binnenschiffmarkt in Richtung energieeffiziente und emissionsarme Systeme ausgelöst hat. Wie oben erwähnt, haben diverse Eigener ihr Interesse an diesen Systemen angemeldet. Zudem sind auch diverse (auch sehr grosse) Projekte in Richtung Hybridisierung am Laufen.

Auch haben die aus dem Projekt hervor gegangenen wissenschaftlichen Papers und Vorträge in der Branche international Aufsehen erregt. Hierbei können die Publikationen [5] im Jahrbuch 2018 der Schiffbautechnischen Gesellschaft oder auch die Vorträge und Publikationen im Rahmen internationaler Konferenzen erwähnt werden (RINA @ Europort 2017, CIMAC Kongress 2019 in Vancouver, Electric and Hybrid Marine Technology World Congress 2018 in Amsterdam, 19. NAV Kongress in Triest, usw.)

Als Folge davon ist das Projektteam bei der Shiptec AG im Begriff die nächsten Schritte in Richtung Zero-Emission-Ship anzugehen. In diesem Zusammenhang muss v.a. das momentan laufende Projekt für ein rein elektrisches Fahrgastschiff für eine grössere schweizerische Schifffahrtsunternehmung erwähnt werden. Insbesondere für den harten Einsatz im öffentlichen Verkehr, bzw. Fahrplanverkehr (ähnlich MS Diamant) geht das Projektteam bereits einen (über-)nächsten Schritt weiter. Wegen der kleinen Energiedichte von Batterien und den kleinen elektrischen Anschlussleistungen an den Landungsstegen, im Verhältnis zum Energiebedarf im Fahrplandienst, ist ein rein elektrischer Betrieb nur begrenzt möglich umzusetzen. Vielmehr muss mit einem Range-Extender gearbeitet werden. Hier bietet sich insbesondere eine Lösung auf Basis eines Wasserstoff-Brennstoffzellen Range-Extender an. Im Gegensatz zur Seeschifffahrt bieten sich hier in der Schweiz besondere Umstände um nachhaltig produzierten Wasserstoff in Binnenschiffen effizient und relativ kostengünstig, bei vertretbaren Risiken und Platzbedarf einzusetzen. Siehe dazu den im Herbst 2019 erstellten Bericht zum BfE geförderten Projekt Helios [9]. Dieser kann auf Nachfrage interessierten Kreisen beim BAV zur Verfügung gestellt werden.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] M. Einsiedler, „Zwischenbericht 2b / 050 Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff, Erste Tests am Pilotschiff, zweiter Teil der Überprüfungen gegenüber den Grundanforderungen,“ Shiptec AG, Luzern, 2017.
- [2] M. Einsiedler, „Zwischenbericht 2a / 050 Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff, Erste Tests am Pilotschiff, zweiter Teil der Überprüfungen gegenüber den Grundanforderungen,“ Shiptec AG, Luzern, 2016.
- [3] M. Einsiedler, „Zwischenbericht 1 / 050 Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff, Analyse der Ausgangslage, Konzeptentwicklung, Komponententests Hard- und Software,“ Shiptec AG, Luzern, 2016.
- [4] M. Einsiedler, „Projektplan Hybrides Antriebssystem für ein Fahrgastschiff,“ Shiptec AG, Luzern, 2016.
- [5] M. Einsiedler, „HYBRID ENERGY- AND PROPULSIONSYSTEM FOR VESSELS IN TIMETABLE OPERATION,“ Shiptec AG, Luzern, 2017.
- [6] E. T. A. L. U.-P. M. D. M. M. E. Franz Sidler, „Energieeffizientes Fahrgastschiff, Energieverbrauchsoptimierte Aufbauten/Hülle und Zusatzsysteme,“ Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2017.
- [7] B. Pape, „MS 2017 - Konzeptvergleich zweier Antriebssysteme,“ DNVGL SE - Maritime FutureShip GmbH, Hamburg, 2014.
- [8] D.-I. C. Gurr, „Untersuchung des Redundanz- und Sicherheitskonzeptes des Hybridantriebs von MS Waldstätter,“ GEC Engineering and Consulting, Hamburg, 2019.
- [9] F. H. D. S. Lukas Schreuder, „Projekt Helios, Modellstudie für H2-Binnenschifffahrt,“ Shiptec AG, Luzern, 2019.
- [10] E. Schweizerische, Verordnung über den Bau und Betrieb von Schiffen und Anlagen öffentlicher Schifffahrtsunternehmen, Bern: [www.admin.ch](http://www.admin.ch), 1994/2016.
- [11] F. Sidler, „Analyse des Energieverbrauchs der Flotte der Schifffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee (SGV),“ Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2018.
- [12] G. Strohammer, „Liste KM-Dieserverbrauch MS 2018,“ Schifffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersee, Luzern, 2019.
- [13] M. Einsiedler, „Sicherheitskonzept, hybrides Antriebssystem MS 2017 (V1.0),“ Shiptec AG, Luzern, 2014.
- [14] M. Einsiedler, „Sicherheitskonzept, hybrides Antriebssystem MS 2017 (V3.0),“ Shiptec AG, Luzern, 2019.

## **7. Anhang**

Datenpunktlisten, sowie Messdaten können auf Verlangen eingesehen werden. Auf Grund der Masse der Daten, sowie der Auswertungen per Skript wird auf das Anhängen detaillierter Daten verzichtet.

Die Erwähnten Zwischenberichte 1 bis 2b sowie der Projektplan liegen dem BAV vor.

\*\*\*