

Siptec AG

# Ökobilanz des Umbaus eines Passagierschiffs auf Wasserstoff- Brennstoffzellen-Antrieb Ergebnisbericht

Vergleichsstudie  
Zürich, 12. Februar 2025

Dr. Ursina Walther, Dr. Brian Cox, Dr. Anne Greinus, INFRAS

## **Impressum**

**Ökobilanz des Umbaus eines Passagierschiffs auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb**  
Vergleichsstudie

Vergleichsstudie  
Zürich, 12. Februar 2025  
Bericht\_Ökobilanz\_final.docx

### **Auftraggeber**

Shiptec AG

### **Projektleitung**

Lou Halter

### **Autorinnen und Autoren**

Dr. Ursina Walther, Dr. Brian Cox, Dr. Anne Greinus

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich  
Tel. +41 44 205 95 95  
info@infras.ch

## Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Ziel und Untersuchungsrahmen</b>	<b>5</b>
2.1. Funktionelle Einheit und Untersuchungsobjekte	5
2.2. Systemgrenzen	5
2.3. Benutzte Methodik der Wirkungsabschätzung	6
<b>3. Sachbilanz</b>	<b>6</b>
<b>4. Resultate</b>	<b>8</b>
4.1. Hauptresultate	8
4.2. Sensitivitätsanalyse	10
<b>5. Schlussfolgerung</b>	<b>12</b>
<b>Annex 13</b>	
A1. Inventare Wasserstoffantrieb	13
A2. Inventare Diesel-Hybrid-Antrieb	14
A3. Resultattabellen	15
<b>Literatur</b>	<b>17</b>

## Zusammenfassung

Die Luzerner Werft Shiptec AG plant den Umbau eines bestehenden Passagierschiffes auf einen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb. Dieses Projekt wird über das Förderprogramm EsöV des Bundesamtes für Verkehr gefördert. Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Treibhausgasemissionen dieser Antriebsalternative mit denen eines Diesel-Hybrid-Antriebs zu vergleichen. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird aus einer Lebenszyklusperspektive erstellt und umfasst den Umbau eines bestehenden Passagierschiffes, den Betrieb und nach der Betriebsphase den Ausbau und die Entsorgung der relevanten Komponenten.

Die Untersuchung zeigt, dass der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb deutlich geringere Emissionen verursacht als der Diesel-Hybrid-Antrieb. Während letzterer über die gesamte Lebensdauer etwa 7.69 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm verursacht, sind es beim Wasserstoff-Antrieb nur 1.26 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm. Trotz höherer Emissionen beim Umbau auf einen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb werden die Emissionen durch die niedrigeren Emissionen während der Betriebsphase mehr als kompensiert. Dies liegt vor allem an der Verwendung von Wasserstoff aus Wasserkraft anstelle von fossilem Diesel und an der höheren Energieeffizienz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs.

Eine Sensitivitätsanalyse bestätigt die Robustheit der Ergebnisse. Selbst bei der Nutzung von Biodiesel bleibt der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb vorteilhaft. Ein CO<sub>2</sub>-intensiveres Herstellungsverfahren für Wasserstoff würde die Emissionen zwar erhöhen, aber dennoch unter denen des Diesel-Hybrid-Antriebs mit konventionellem Diesel bleiben. Zudem zeigt eine Variation des Wasserstoffverbrauchs um ±20 %, dass die Vorteile des Wasserstoffantriebs auch bei höheren Verbrauchswerten weiterhin bestehen.

Insgesamt ergibt die Studie, dass der Umbau des Passagierschiffes auf einen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb Vorteile für den Klimaschutz bietet. Die Emissionen während des Betriebs sind deutlich geringer als beim Diesel-Hybrid-Antrieb, wodurch sich die höheren Emissionen des Umbaus langfristig amortisieren. Der Einsatz erneuerbarer Energie für die Wasserstoffproduktion verstärkt diesen Vorteil zusätzlich.

## 1. Einleitung

Die Luzerner Werft Shiptec AG arbeitet an der Konzeption und Planung des Umbaus eines bestehenden Passagierschiffes auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb. Das Projekt wird vom Bundesamt für Verkehr über das Förderprogramm EsÖV unterstützt. Im Rahmen des Projekts sollen die Treibhausgasemissionen dieses Vorhabens untersucht werden. Es ist aufzuzeigen, wie viel Treibhausgasemissionen (THG) durch den geplanten Umbau im Vergleich zum Einsatz eines neuinstallierten Diesel-Hybrid-Antriebs eingespart werden könnten.

Ziel der vorliegenden Studie ist es die beiden Antriebsalternativen in Bezug auf ihre ökologischen Auswirkungen zu vergleichen. Dafür wurde eine CO<sub>2</sub>-Bilanz für den Umbau und Betrieb des Passagierschiffes für die beiden Antriebsalternativen Wasserstoff-Brennstoffzellen und Diesel-Hybrid erstellt und verglichen. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz berechnet aus einer Lebenszyklusperspektive die THG-Emissionen. Berücksichtigt werden dabei insbesondere die folgenden Bereiche:

- Schiffsumbau inkl. Herstellung, Installation, Ausbau, und Recycling bzw. Entsorgung der relevanten Komponenten wie Dieselgeneratoren, Brennstoffzellen, Wasserstofftanks, Batterien, Trennräume, Verkabelung usw.
- Kraftstoffherstellung und Logistik
- Direkte Emissionen aus der Dieselverbrennung
- Wartung bzw. Austausch von Komponenten

Die hier präsentierten Resultate werden den Zwischenbericht des Projektes ergänzen, die Auswirkungen des Umbaus auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb in Bezug auf die Treibhausgasemissionen eingeordnet werden können.

## 2. Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Studie ist es, die beiden Antriebsalternativen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb und Diesel-Batterie-Hybrid-Antrieb hinsichtlich der damit verbundenen Treibhausgasemissionen zu vergleichen und die Hypothese zu überprüfen, dass ein Umstieg auf den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb hinsichtlich des Klimaschutzes Vorteile bringt.

### 2.1. Funktionelle Einheit und Untersuchungsobjekte

Die Bewertung eines Produktes, eines Verfahrens oder einer Komponente muss immer im Vergleich zu Alternativen erfolgen, die den gleichen Nutzen erbringen bzw. die gleiche Funktion erfüllen. Die Größe, auf die sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit bezeichnet.

In dieser Studie werden zwei Antriebsalternativen für ein Passagierschiff verglichen. Die zugrunde liegende Funktion ist damit die Fahrt des Schiffes über die Strecke, die es in 20 Jahren Betriebszeit zurücklegt. Dabei wird auch berücksichtigt, dass die Komponenten unterschiedliche Lebensdauern aufweisen und teilweise innerhalb der 20 Jahre Betriebszeit ersetzt werden müssen. Für den Vergleich der beiden Antriebsalternativen werden die Emissionen auf die geleistete Fahrleistung in den 20 Jahren normiert (kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm).

### 2.2. Systemgrenzen

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz betrachtet die potenziellen Treibhausgasemissionen der beiden Antriebsalternativen über die gesamte Lebensphase. Für diese Untersuchung werden alle relevanten Prozesse für den Umbau, den Betrieb und den Ausbau des Antriebssystems bewertet. Der Bau und die Entsorgung des Passagierschiffes selbst werden dabei nicht berücksichtigt.

Inhaltliche Systemgrenzen definieren welche Prozesse und Dienstleistungen bei der Erstellung der CO<sub>2</sub>-Bilanz berücksichtigt werden. Die vorliegende Studie berücksichtigt grundsätzlich folgende Prozesse und Dienstleistungen:

- Bereitstellung der Rohstoffe
- Herstellung von Grund- und Hilfsstoffen sowie materielle Ressourcen
- Transport der Grund- und Hilfsstoffe inklusive der dafür benötigten Infrastruktur und Treibstoffbereitstellung
- Bereitstellung der Energie und der Treibstoffe für den Betrieb inklusive Herstellungsprozesse und Transport.
- Ausbau und Entsorgung

Als zeitliche Systemgrenze wurde das Jahr 2024 definiert und es wurde versucht möglichst aktuelle Daten für die Erstellung der Vordergrunddaten zu verwenden.

### 2.3. Benutzte Methodik der Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf die Treibhausgasemissionen. Dafür stützen wir uns auch die IPCC 2021 Methodik. Diese berücksichtigt neben CO<sub>2</sub> weitere Treibhausgase, die anhand der Faktoren des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) in CO<sub>2</sub>-äquivalente umgerechnet werden. Für diese Studie beziehen wir uns auf den Standardbetrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP-100).

## 3. Sachbilanz

Die baulichen Anpassungen, Komponenten und Materialien, die für den Umbau des bestehenden Passagierschiffs für die beiden Antriebsalternativen notwendig wären, konnten wir anhand einer detaillierten Komponentenlisten von der Shiptec AG ableiten. Für die Vorketten der verschiedenen Komponenten und baulichen Massnahmen (Materialien und Energieträger), sowie für den nachfolgenden Ausbau und die Entsorgung des Antriebs griffen wir auf die Datensätze der Umweltbilanzdatenbank des Bundes (UVEK 2024) zurück. Grundsätzlich versuchten wir möglichst den Komponenten entsprechende Datensätze zu verwenden, doch gewisse Vereinfachungen und Annäherungen waren aufgrund beschränkter Datenverfügbarkeit nötig. Während die Antriebssysteme relativ genau mit Datensätze für die Brennstoffzellen, den Elektromotor und elektrischer Generator abgebildet werden konnten, stützten wir uns für die allgemeinen Komponenten auf den Datensatz für ein Lastkahn und skalierten diesen über das Gewicht. Für die elektrischen Komponenten verwendeten wir Datensätze für Lastwagen als Annäherung. Eine detaillierte Übersicht über die verwendeten Datensätze für die beiden Antriebsalternativen ist im Anhang zu finden.

Für den Vergleich nahmen wir für beide Antriebsalternativen eine Betriebszeit von 20 Jahren und eine gesamte Fahrleistung von 405'900 Fzkm an, bis der Antrieb wieder ausgebaut und gesamthaft erneuert wird. Entsprechend der Annahmen zur Lebensdauer der einzelnen Komponenten berücksichtigten wir dessen Ersatz und Austausch in den 20 Jahren Betrieb und berechneten für die beiden Antriebsalternativen Emissionen je Fahrleistung.

### Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb

Das hier modellierte Antriebssystem ist auf 20 Jahre ausgelegt. Die Brennstoffzelle des Typs PEM besteht aus 3 Modulen mit einer gesamthaften Nennleistung von 135 kW und einem Gewicht von 1'500 kg. Die Lebensdauer der Stacks beträgt 7 Jahre. Es werden zwei Elektro-Antriebsmotoren von je 490 kg verbaut mit einer Lebensdauer von 10 Jahren. Für die Energiespeicherung sind 3 NMC-Batterien von jeweils 208 kWh nutzbarer Energie und einem gesamthaften Gewicht von 6'540 kg vorgesehen. Die Lebensdauer der Batterien beträgt ebenfalls 10 Jahre. Zur Speicherung des Wasserstoffs werden 14 Wasserstofftanks mit einem nominalen Druck von jeweils 350 bar eingebaut, die jeweils 8.2 kg Wasserstoff fassen. Die Tanks

wiegen 1'680 kg und haben eine Lebensdauer von 20 Jahre. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der Umbau auf den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb die Erstellung einiger Zwischenräume benötigt, die für die Diesel-Hybridvariante nicht notwendig sind.

Für den Betrieb des Passagierschiffs mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb stützen wir uns auf Simulationsdaten, die den Wasserstoff- und Stromverbrauch modellierten. Diese Daten stellte uns die Shiptec AG zur Verfügung. Für den Betrieb des Passagierschiffes mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb wird mit einem Wasserstoffverbrauch von 0.3 kg /km und einem Stromverbrauch von 3.79 kWh/km gerechnet. Dies ergibt einen Endenergieverbrauch von 50 MJ/km mit einem Wasserstoffanteil von 72 %. Die Datensätze für die Vorketten (Wasserstoffherstellung und Logistik, Stromherstellung) konnten wir der Umweltbilanzdatenbank des Bundes (UVEK 2024) entnehmen. Wir nahmen leichte Anpassungen vor, um das geplante Herstellungsverfahren (ausschliessliche Nutzung von Wasserkraft zur Wasserstoffherstellung) und die Logistik abzubilden. Die Tabelle 1 zeigt für den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb die berücksichtigten Komponenten und Mengen, sowie die geschätzten Treibstoff- und Energieverbräuche für die 20-jährige Betriebszeit.

**Tabelle 1: Übersicht berücksichtigte Komponenten für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb über die gesamte Betriebszeit**

Phase	Komponenten	Menge
Umbau – Ausbau und Entsorgung	Allgemeine Komponenten	3'640 kg
	Elektrische Komponenten	5'640 kg
	Antriebssystem	2'962 kg
	Energiespeicherung	1'107 kg
Umbau – Herstellung und Einbau	Allgemeine Komponenten	19'949 kg
	Elektrische Komponenten	10'722 kg
	Antriebssystem	10'006 kg
	Energiespeicherung	15'455 kg
Betrieb	Stromverbrauch	1'537'155 kWh
	Wasserstoffverbrauch	121'428 kg
Ausbau und Entsorgung	Allgemeine Komponenten	19'949 kg
	Elektrische Komponenten	10'722 kg
	Antriebssystem	10'006 kg
	Energiespeicherung	15'455 kg

Tabelle INFRAS. Quelle: Shiptec AG

### Diesel-Hybrid-Antrieb

Das Antriebssystem ist ebenfalls auf 20 Jahre ausgelegt. Für die Berechnungen gehen wir davon aus, dass das Antriebssystem wie im Bestand 3 Gensets umfasst mit einem Gewicht von 3'690 kg und zwei elektrischen Antriebsmotoren mit einem gesamthaften Gewicht von 980 kg. Für beide gehen wir von einer Lebensdauer von 10 Jahren aus. Zusätzlich wird ein Abgasbehandlungssystem berücksichtigt, das den aktuellen Vorschriften entspricht und eine Lebensdauer von 25 Jahre aufweist. Dessen Gewicht schätzen wir auf 200 kg. Für den Diesel-Hybridantrieb ist ein Batteriespeicher von 260 kWh vorgesehen mit einem geschätzten Gewicht von 2'300 kg und einer Lebensdauer von ebenfalls 10 Jahren. Der Dieseltank des bestehenden Passagierschiffes kann für den Diesel-Hybrid-Antrieb weiterverwendet werden.

Den Dieselverbrauch des Passagierschiffes mit Diesel-Hybrid-Antrieb schätzen wir anhand der Treibstoffverbrauchsdaten des Passagierschiffs im Jahr 2023 (2.43 L/km). Den Verbrauch korrigierten wir

entsprechend der Erfahrungswerte der Shiptec AG um 7'510 Liter pro Jahr nach unten und verwendeten für die Berechnungen ein Dieserverbrauch von 2.06 L/km. Damit berücksichtigten wir, dass zukünftig der Diesel-Hybrid-Antrieb zum Teil mit Landstrom betrieben wird und, dass der neuinstallierte Hybrid-Antrieb etwas effizienter sein wird als das aktuelle Schiff. Zusätzlich berücksichtigten wir dafür die Herstellungsemissionen verursacht durch den Stromverbrauch. Den Stromverbrauch schätzten wir anhand Daten der Shiptec AG auf 1.01 kWh/km. Dies ergibt einen Endenergieverbrauch von 81 MJ/km mit einem Dieselanteil von 96%.

Für die Treibstoff- und Stromherstellung stützen wir uns auf Datensätze der Umweltbilanzdatenbank des Bundes (UVEK 2024). Die direkten Emissionen der Dieserverbrennung berechneten wir anhand Emissionsfaktoren der Non-Road Datenbank des Bundes (BAFU, 2015 für ein Fahrgastschiff mit der Leistungs-kategorie 130-300kW und der Emissionsstufe D EU5. Die Tabelle 2 zeigt für den Diesel-Hybrid-Antrieb die berücksichtigten Komponenten und Mengen, sowie die geschätzten Treibstoff- und Energieverbräuche für die 20-jährige Betriebszeit.

**Tabelle 2: Übersicht berücksichtigte Komponenten für Diesel-Hybrid-Antrieb**

Phase	Komponenten	Menge
Umbau – Ausbau und Entsorgung	Allgemeine Komponenten	3'365 kg
	Elektrische Komponenten	5'190 kg
	Antriebssystem	2'962 kg
	Energiespeicherung	530 kg
Umbau – Herstellung und Einbau	Allgemeine Komponenten	7'229 kg
	Elektrische Komponenten	10'722 kg
	Antriebssystem	11'728 kg
	Energiespeicherung	5'290 kg
Betrieb	Stromverbrauch	409'682 kWh
	Dieserverbrauch	701'702 kg
Ausbau und Entsorgung	Allgemeine Komponenten	7'229 kg
	Elektrische Komponenten	10'722 kg
	Antriebssystem	11'728 kg
	Energiespeicherung	5'290 kg

Tabelle INFRAS. Quelle: Shiptec AG

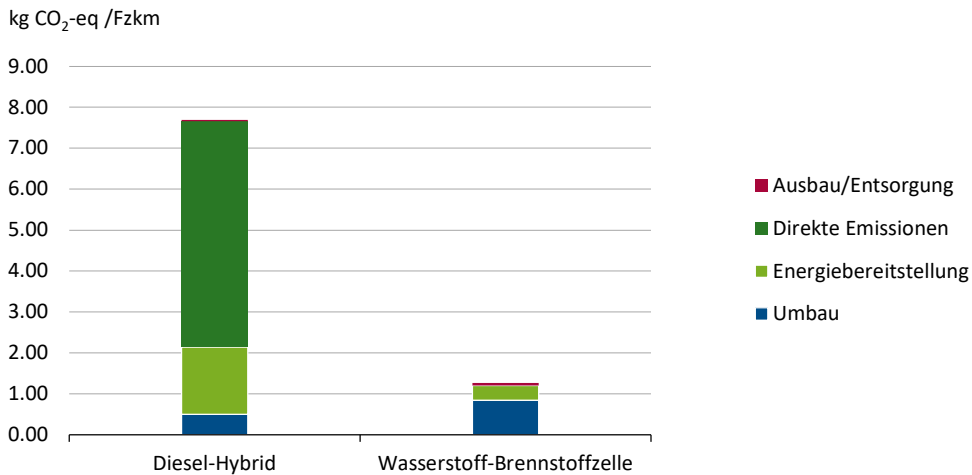
## 4. Resultate

### 4.1. Hauptresultate

Der Vergleich der Emissionen je Fahrleistung (kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm) der beiden Antriebsalternativen zeigt klar, dass der Umbau und Betrieb des Passagierschiffs mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb weniger Treibhausgasemissionen verursacht als der Diesel-Hybrid-Antrieb (Abbildung 1). Die Umrüstung und der Betrieb des Diesel-Hybrid-Antriebs verursachen etwa die sechsfachen Emissionen im Vergleich zum Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb (7.69 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm für Diesel-Hybrid; 1.26 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm für Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb). Dabei werden die zusätzlichen Emissionen insbesondere durch direkte Emissionen des Verbrennungsmotors während dem Betrieb verursacht. Es zeigt sich also, dass der Umbau des Fahrgastschiffes auf den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb zwar höhere Emissionen verursacht, diese aber im Vergleich zu den Emissionen während des Betriebs durch die Energiebereitstellung und die direkten

Emissionen eine untergeordnete Rolle spielen. Denn im Betrieb sind die Emissionseinsparungen durch den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb ungleich höher. Dies liegt daran, dass für den Diesel-Hybrid-Antrieb fossiler Diesel verwendet wird, während das Passagierschiff mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb mit erneuerbarem Wasserstoff betrieben wird. Zudem ist der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb (50 MJ/km Endenergie) effizienter als der Diesel-Hybrid-Antrieb (81 MJ/km Endenergie) und hat ausserdem einen höheren Landstromanteil, was die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Schiffes noch weiter reduziert.

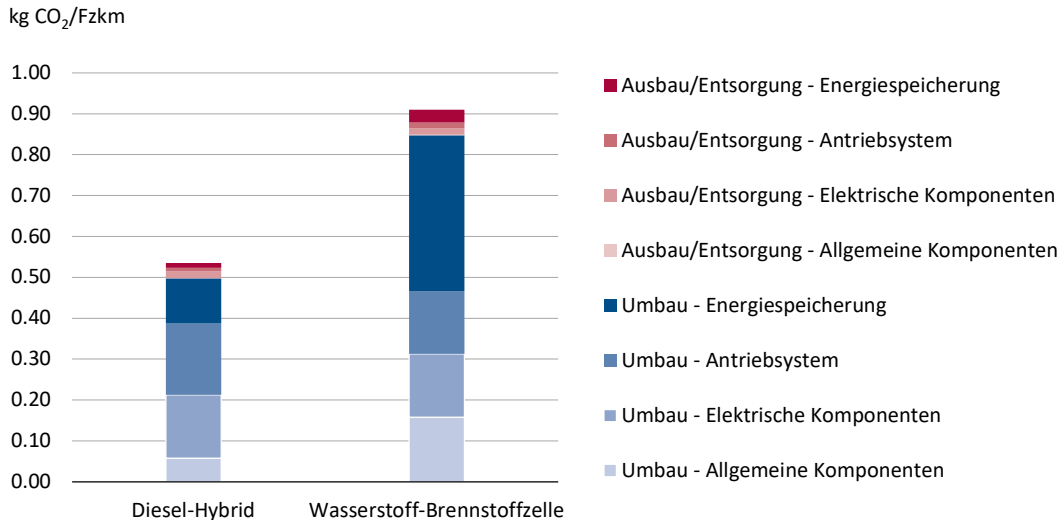
**Abbildung 1: Vergleich Treibhausgasemissionen der beiden Antriebsalternativen**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 2 zeigt eine differenzierte Übersicht über die Emissionen des Umbaus, sowie des Ausbaus und der Entsorgung des Antriebsystems. Der Umbau und die Herstellung, sowie der Ausbau und die Entsorgung der Komponenten für den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb (0.91 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm) verursachen höhere Emissionen im Vergleich zum Diesel-Hybrid-Antrieb (0.54 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm). Insbesondere die Herstellung der Batterie zur Energiespeicherung und des Wasserstofftanks sind emissionsintensiver als die entsprechenden Komponenten des Diesel-Hybrid-Antriebs. Dies liegt insbesondere daran, dass beim Diesel-Hybrid-Antrieb einen deutlich kleineren Batteriespeicher eingesetzt wird und der bestehende Dieseltank weiter genutzt werden kann. Diese höheren Emissionen des Umbaus auf den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb werden aber durch die niedrigeren Emissionen während der Treibstoffherstellungs- und Betriebsphase mehr als kompensiert.

**Abbildung 2: Differenzierte Übersicht der Treibhausgasemissionen des Umbaus und Ausbaus der beiden Antriebsalternativen Diesel-Hybrid und Wasserstoff-Brennstoffzellen**



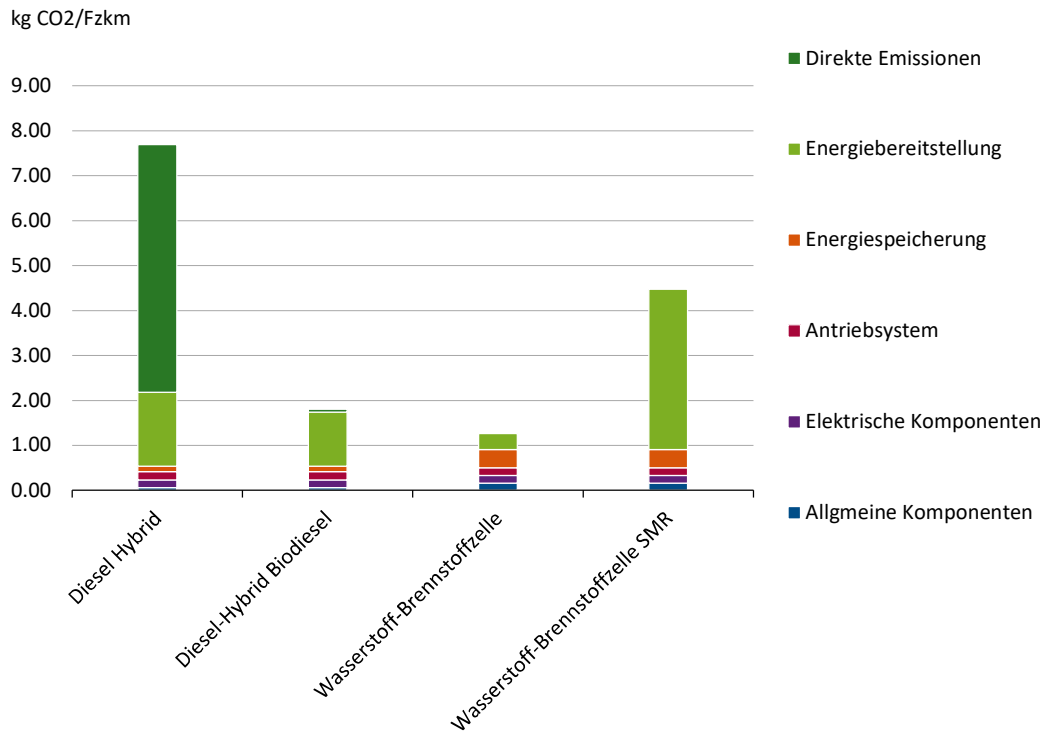
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen

## 4.2. Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchten wir mehrere Aspekte, die möglicherweise die Resultate des Vergleichs beeinflussen können. Dazu zählt die Verwendung von Biodiesel als weniger CO<sub>2</sub>-intensive Alternative zum Diesel, ein CO<sub>2</sub>-intensiveres Wasserstoffherstellungsverfahren SMR, sowie ein höherer und tieferer Wasserstoffverbrauch.

Die hypothetische Verwendung von Biodiesel anstelle von Diesel führt dazu, dass damit die direkten Emissionen während der Betriebsphase deutlich reduziert werden können. Dennoch schneidet der Diesel-Hybrid-Antrieb mit Biodiesel betrieben immer noch schlechter ab als der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb mit 1.81 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm im Vergleich zu 1.26 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm. Dies ist auf die höhere Effizienz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs zurückzuführen, dessen Endenergieverbrauch im Vergleich zum Diesel-Hybrid-Antrieb nur ca. 60% beträgt (50 MJ/km statt 81 MJ/km). Würde der Wasserstoff jedoch nicht über die Elektrolyse und die Nutzung von Wasserkraft, sondern über die deutlich CO<sub>2</sub>-intensivere Methan-Dampf-Reformierung (SMR, Steam Methane Reforming) erzeugt, würde der mit Biodiesel betriebene Diesel-Hybrid-Antrieb besser abschneiden. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebes liegt in diesem Fall deutlich höher bei 4.48 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm. Im Vergleich zum konventionellen Diesel-Hybrid-Antrieb jedoch, fallen die Emissionen des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs über den gesamten Lebenszyklus auch unter der Verwendung von weniger klimafreundlich hergestelltem Wasserstoff immer noch geringer aus (7.69 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm für den Diesel-Hybrid-Antrieb). Damit lässt sich festhalten, dass in der Verwendung von erneuerbarer Energie beziehungsweise Bioenergie für den Betrieb des Schiffes ein deutliches Reduktionspotential für Treibhausgasemissionen liegt.

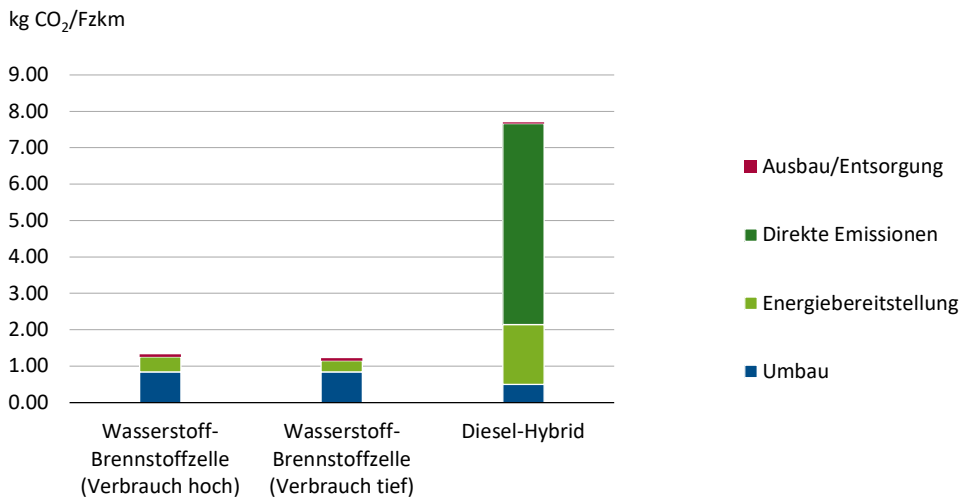
Abbildung 3: Vergleich Einfluss Treibstoffalternativen und Herstellungsverfahren auf THG-Bilanz



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen

Für die hier vorgestellten Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Bilanz wurde der Wasserstoffverbrauch des Passagierschiffes auf Basis von Leistungsmessungen an der Schiffswelle des Saphir in der aktuellen Konfiguration und Annahmen über die Effizienz der Brennstoffzelle, der Batterie und eines Energiemanagementsystems durch Simulationen abgeschätzt. Diese Schätzung ist mit etwas Unsicherheiten behaftet. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variierten wir deshalb den Wasserstoffverbrauch um  $\pm 20\%$ . Dies entspricht in etwa die Maximalgrenze der Bandbreite, in der sich der Verbrauch voraussichtlich bewegen könnte. Unter der Annahme eines 20% höheren Wasserstoffverbrauchs liegen die Treibhausgasemissionen der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs bei 1.32 kg CO<sub>2</sub>/Fzkm und damit rund 5% höher im Vergleich zu den Berechnungen mit der ursprünglichen Verbrauchsschätzung. Der Vergleich mit den Resultaten des Diesel-Hybrid-Antriebs zeigt, dass auch unter der Annahme eines 20% höheren Wasserstoffverbrauchs die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebes deutlich besser ausfällt.

**Abbildung 4: Übersicht CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs unter Annahme eines hohen und tiefen Wasserstoffverbrauchs im Vergleich zum Diesel-Hybrid**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen

## 5. Schlussfolgerung

Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-Bilanz der beiden Antriebsalternativen zeigt klar, dass ein Umbau des Passagierschiffes auf einen Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb deutliche Vorteile bezüglich des Klimaschutzes bringt. Während über die gesamte Lebensphasen der Diesel-Hybrid-Antrieb rund 7.69 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm verursacht, verursacht ein auf Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb umgebautes Passagierschiff deutlich geringere Emissionen mit 1.26 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm. Zwar ist der der Umbau für den Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb mit höheren Emissionen verbunden (0.91 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm inkl. Ausbau und Entsorgung), diese werden jedoch während dem Betrieb bei weitem kompensiert. Im Betrieb verursacht das Passagierschiff mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb nur rund 0.35 kg CO<sub>2</sub>-eq/Fzkm und damit knapp 5% der Emissionen, die der Betrieb eines Diesel-Hybrid-Antriebes verursachen würde (7.16 kg CO<sub>2</sub>-eq./Fzkm). Daraus lässt sich ableiten, dass die Umweltwirkungen des Umbaus und des Betriebs des Passagierschiffes auf einen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb hinsichtlich der Treibhausgasemissionen deutlich geringer ausfallen und damit im Vergleich zur konventionellen Diesel-Hybrid-Alternative aus Sicht des Klimaschutzes vorteilhaft zu bewerten sind.

## Annex

### A1. Inventare Wasserstoffantrieb

**Tabelle 3: Übersicht Bilanzierung und Sachbilanzdaten für Passagierschiff mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb**

Komponenten	Menge	Sachbilanzdatensatz
<b>Umbau - Ausbau</b>		
Allgemeine Komponenten	3'640 kg	Disposal, lorry 16t
Antrieb	1'950 kg	Disposal internal combustion engine
El. Komp. Antriebsystem	3'690 kg	Dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
El. Komponenten	452 kg	Dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Schaltschrank	10 kg	Disposal control and wiring, central unit
Kabel und Trasse	2'500 kg	Disposal treatment of cables
Dieseltank	577 kg	Disposal, lorry 16t
Notbatterie	530 kg	Disposal, Li-ions batteries, mixed technology
<b>Umbau – Einbau</b>		
Allgemeine Komponenten	19'949 kg	Barge
Antriebsystem: Hilfssysteme	588 kg	Ancillary BoP
Antriebsystem: Brennstoffzelle	4'286 kg	Stack / Essential BoP
Antriebsystem: Peripheriekomponenten	884 kg	Essential BoP
Antriebsystem: Weitere Steuerungselemente	2'056 kg	Battery BoP
E-Antriebsmotor	1'960 kg	Electric motor, electric vehicle, at plant
Inverter	112 kg	Inverter, for electric passenger car
Allgemeine Elektronik	3'916 kg	power electronics, for lorry
Verteilsystem	6 kg	Power distribution unit, for electric passenger car
Kabel	6'000 kg	Cable, three-conductor cable, at plant
Kabeltrasse	800 kg	barge
Batteriesystem	13'080 kg	Battery system, NMC-622
El. Komponenten für Batteriesystem	63 kg	Batterie BoP
Wasserstofftank	1'680 kg	fuel tank, compressed hydrogen gas, 700 bar, with HDPE liner RER
Notbatterie	632 kg	lead acid battery, for lorry
<b>Betrieb</b>		
Wasserstoff	121'428 kg	Hydrogen, gaseous, 350 bar, from electrolysis, hydro-power electricity, at fuelling station
Strom	121'428 kWh	electricity, low voltage, certified electricity, at grid/kWh

Komponenten	Menge	Sachbilanzdatensatz
<b>Ausbau - Entsorgung</b>		
Allgemeine Komponenten	19'949 kg	Disposal, lorry 16t
Antrieb: Brennstoffzelle	4'286 kg	Disposal, Li-ions batteries, mixed technology
Antriebsystem	5'720 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Allgemeine Elektronik und Verteilsystem	3'922 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Kabel	6'000 kg	Disposal treatment of cables
Kabeltrasse	800 kg	Disposal, lorry 16t
Batteriesystem	13'080kg	Disposal, Li-ions batteries, mixed technology
El. Komponenten für Batteriesystem	63 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Wasserstofftank	1680 kg	Disposal, lorry 16t
Notbatterie	632 kg	disposals treatment of batteries

Tabelle INFRAS. Quelle: Komponentenliste Shiptec AG, Umweltbilanzdatenbank (BAFU 2024), Ecoinvent 3.10

## A2. Inventare Diesel-Hybrid-Antrieb

**Tabelle 4: Übersicht Bilanzierung und Sachbilanzdaten für Passagierschiff mit Diesel-Hybrid-Antrieb**

Komponenten	Menge	Sachbilanzdatensatz
<b>Umbau - Ausbau</b>		
Allgemeine Komponenten	3'365 kg	Disposal, lorry 16t
Antriebsystem el. Komponenten	3'690 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Antriebsmotor	1'500 kg	disposal internal combustion engine for passenger car
Elektr. Komponenten	452 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Verteileinheit	10 kg	Disposal control and wiring, central unit
Kabel und Trasse	2'500 kg	Kabel
Notbatterie	530 kg	Disposal, Li-ions batteries, mixed technology
<b>Umbau - Einbau</b>		
Allgemeine Komponenten	7'229 kg	barge
Inverter	112 kg	Inverter, for electric passenger car
E-Antriebsmotor	1'960 kg	Electric motor, electric vehicle, at plant
Abgasreinigungssystem	160 kg	Exhaustsystem
Genset	7'440 kg	market for generator, 200kW electrical
Allgemeine Elektronik	3'916kg	power electronics, for lorry
Verteilsystem	6 kg	Power distribution unit, for electric passenger car
Kabel	6'000 kg	Cable, three-conductor cable, at plant
Kabeltrasse	800 kg	barge
Batteriesystem	4'596 kg	Battery system, NMC-622
Elektronik für Batterie	63 kg	Battery BoP
Notbatterien	632 kg	lead acid battery, for lorry

Komponenten	Menge	Sachbilanzdatensatz
<b>Betrieb</b>		
Diesel	701'702 kg	Vorkette (UVEK DB) und direkte Emissionen (basierend of non-road DB, BAFU)
Strom	409'682 kWh	electricity, low voltage, certified electricity, at grid/kWh
<b>Ausbau und Entsorgung</b>		
Allgemeine Komponenten	7'229 kg	Disposal, lorry 16t
Antriebsystem	11'568 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Abgasreinigungssystem	160 kg	Disposal, lorry 16t
Allgemeine Elektronik und Verteil-system	3'922 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Kabel	6'000 kg	Disposal treatment of cables
Kabeltrasse	800 kg	Disposal, lorry 16t
Batteriesystem	4'596 kg	Disposal, Li-ions batteries, mixed technology
El. Komponenten für Batteriesys-tem	63 kg	dismantling el. Devices and shredding el. Scrap
Notbatterie	632 kg	Disposals treatment of batteries

Tabelle INFRAS. Quelle: Komponentenliste Shiptec AG, Umweltbilanzdatenbank (BAFU 2024), Non-road DB (BAFU, 2015)

### A3. Resultattabellen

**Tabelle 5: Detaillierte Resultate THG-Emissionen der beiden Antriebsalternativen**

THG-Emissionen	Diesel-Hybrid		Wasserstoff-Brennstoffzelle	
	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg CO <sub>2</sub> eq/Fzkm]	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg CO <sub>2</sub> eq/Fzkm]
<b>Umbau (Lebensdauer Komponenten berücksichtigt)</b>				
Allgemeine Komponenten	23'369	0.06	64'234	0.16
Elektrische Komponenten	62'962	0.16	62'962	0.16
Antriebsystem	70'968	0.17	62'126	0.15
Energiespeicherung	44'808	0.11	154'499	0.38
	202'106	0.50	343'821	0.85
<b>Betrieb</b>				
Energiebereitstellung	666'142	1.64	142'592	0.35
Direkte Emissionen	2'239'650	5.52		
	2'905'792	7.16	142'592	0.35
<b>Ausbau/Entsorgung</b>				
Allgemeine Komponenten	318	0.00	743	0.00
Elektrische Komponenten	6'506	0.02	6'506	0.02
Antriebsystem	3'615	0.01	5'698	0.01
Energiespeicherung	4'805	0.01	12'572	0.03
	15'245	0.04	25'520	0.06
<b>Gesamte Emissionen</b>	<b>3'123'143</b>	<b>7.69</b>	<b>511'934</b>	<b>1.26</b>

**Tabelle 6: Detaillierte Resultate THG-Emissionen des Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebes unter Annahme eines höheren und tieferen Wasserstoffverbrauchs**

THG-Emissionen	Wasserstoff-Brennstoffzelle Verbrauch tief (-20%)		Wasserstoff-Brennstoffzelle Verbrauch hoch (+20%)	
	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg CO <sub>2</sub> eq/Fzkm]	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg CO <sub>2</sub> eq/Fzkm]
<b>Umbau (Lebensdauer Komponenten berücksichtigt)</b>				
Allgemeine Komponenten	64'234	0.16	64'234	0.16
Elektrische Komponenten	62'962	0.16	62'962	0.16
Antriebsystem	62'126	0.15	62'126	0.15
Energiespeicherung	154'499	0.38	154'499	0.38
	343'821	0.85	343'821	0.85
<b>Betrieb</b>				
Energiebereitstellung	122'775	0.30	166'373	0.41
Direkte Emissionen				
	122'775	0.30	166'373	0.41
<b>Ausbau/Entsorgung</b>				
Allgemeine Komponenten	743	0.00	743	0.00
Elektrische Komponenten	6'506	0.02	6'506	0.02
Antriebsystem	5'698	0.01	5'698	0.01
Energiespeicherung	12'572	0.03	12'572	0.03
	25'520	0.06	25'520	0.06
<b>Gesamte Emissionen</b>	<b>492'116.50</b>	<b>1.21</b>	<b>535'714.40</b>	<b>1.32</b>

**Tabelle 7: Detaillierte Resultate THG-Emissionen der beiden Antriebsalternativen bei Einsatz von Biodiesel und CO<sub>2</sub>-intensiverem Wasserstoffherstellungsverfahren (SMR)**

THG-Emissionen	Diesel-Hybrid (Biodiesel)		Wasserstoff-Brennstoff-Zellen (SMR)	
	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg CO <sub>2</sub> eq/Fzkm]	[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg CO <sub>2</sub> eq/Fzkm]
<b>Umbau (Lebensdauer Komponenten berücksichtigt)</b>				
Allgemeine Komponenten	23'369	0.06	64'234	0.16
Elektrische Komponenten	62'962	0.16	62'962	0.16
Antriebsystem	70'968	0.17	62'126	0.15
Energiespeicherung	44'808	0.11	154'499	0.38
	202'106	0.50	343'821	0.85
<b>Betrieb</b>				
Energiebereitstellung	487'049	1.20	1'448'099	3.57
Direkte Emissionen	29'288	0.07		
	516'337	1.27	1'448'099	3.57
<b>Ausbau/Entsorgung</b>				
Allgemeine Komponenten	318	0.00	743	0.00
Elektrische Komponenten	6'506	0.02	6'506	0.02
Antriebsystem	3'615	0.01	5'698	0.01
Energiespeicherung	4'805	0.01	12'572.29	0.03
	15'245	0.04	25'520	0.06
<b>Gesamte Emissionen</b>	<b>733'687.99</b>	<b>1.81</b>	<b>1'817'440.19</b>	<b>4.48</b>

## Literatur

**BAFU, 2024:** Umweltbilanzdatenbank der Bundesverwaltung

**BAFU 2015:** Non-Road Database, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/state/non-road-datenbank.html>

**IPCC 2021:** Sixth Assessment Report Global Warming Potentials

**Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016:** The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9), Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>