



Machbarkeitsstudie Emissionsarme Fähre im Rahmen des Projektes Smarte Region Linz

Modellprojekt Smarte Region Linz
Handlungsfeld: Inter-/Multimodale Mobilität verbindet

Juni 2023

Herausgeber:

Stadt Linz am Rhein
Marktplatz 14
53545 Linz am Rhein

Erarbeitung durch:

Exxeta AG
Albert-Nestler-Str. 19
76131 Karlsruhe

Autoren:

Andreas Döhrer
Andreas Steinmetz
Alexander Plarre
Lukas Buß

Unterstützt durch:

Rheinfähre Linz-Kripp GmbH
Petrus-Sinzig-Straße 5
53545 Linz am Rhein

Modellprojekt Smarte Region Linz
Marktplatz 14 • 53545 Linz am Rhein
Tel. 015172420599 • smartcity@linz.de

Facebook: Smarte Region Linz • Instagram: smarte_region_linz



KFW

Vorbemerkungen/Disclaimer

Die vorliegende Machbarkeitsstudie wurde im Kontext des Projektes „Smarte Region Linz am Rhein“ erstellt. Ziel der Studie ist es, Emissionsminderungspotenziale aufzuzeigen, deren Erschließung durch die Anwendung neuer (digitaler) Technologien in einer Umsetzungsphase möglich werden kann. Die Entscheidung über die Verwirklichung einzelner Umsetzungsvarianten bzw. Teilmaßnahmen obliegt der Smarten Region Linz in Abstimmung mit dem Fördermittelgeber.

Die Studie soll anderen Fährgesellschaften und -betreibern Motivation, Anhaltspunkte und/oder Erkenntnisse für eigene Aktivitäten und Maßnahmen liefern.

In diesem Zusammenhang wird darauf verwiesen, dass die Überlegungen unter Einbindung interessierter Fähr Gäste und der Öffentlichkeit sowie der EigentümerInnen und des Betreibers stattgefunden haben. Dies soll sowohl eine breite Basis von Ideen und Anregungen als auch Akzeptanz für potenziell umzusetzende Teilmaßnahmen schaffen.

Exxeta berät weder im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie noch in anderem Zusammenhang in rechtlichen Fragen. So rechtliche Fragestellungen nach Ansicht von Exxeta in der weiteren Folge zu klären sind, wird darauf verwiesen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1. Einleitung.....	10
1.1. Hintergrund.....	10
1.2. Ziel und Zweck des Vorhabens.....	10
1.3. Ausgangslage	11
2. Methodik	14
1.3 Beschreibung der Bewertungskriterien	14
1.4 Partizipativer Ansatz.....	16
3. Ideen/Varianten und Ansätze zur möglichen Emissionsminderung	17
3.1 Fossile Treibstoffe.....	17
3.2 Synthetische Treibstoffe	21
3.3 Biologische Treibstoffe.....	23
3.4 Sonderkonzepte.....	25
4. Eingrenzung der Konzepte anhand der potenziell umsetzbaren Emissionsreduktion und der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit.....	28
4.1 Potenziell umsetzbare Emissionsreduktion	28
4.2 Nachrüstung, Umbau und Neuanschaffung.....	37
4.3 Vor- und nachgelagerte Infrastruktur.....	42
4.4 Wirtschaftlichkeit	47
4.5 Zwischenfazit.....	54
5. Teilmaßnahmen und Ansätze der Emissionsreduktion durch Digitalisierung... ..	56
5.1 Wartezeitanzeige als Webanwendung / App	56
5.2 Wartezeitanzeige auf der B42	57
5.3 Echtzeit-Videoübertragung der Wartesituation.....	57

5.4	Vorregistrierung der Kunden in Randzeiten und Vergabe von Fahrzeitfenstern für Randzeiten.....	58
5.5	Weiträumige Anzeigetafeln zur Fährsituation	59
5.6	Lückenlose Netzabdeckung.....	59
5.7	Einweisungsunterstützung per LED.....	59
5.8	Bezahlsystem mit kameragestützter Kennzeichenerkennung (LKW).....	60
6.	Konzept 1: Die Pionierlösung - Wasserstoff.....	62
6.1	Wirtschaftliche Machbarkeit.....	62
6.2	Politische und öffentliche Machbarkeit.....	64
6.3	Organisatorische Machbarkeit	65
6.4	Ressourcenbezogene Machbarkeit.....	66
7.	Konzept 2: Geringster Umrüstungsaufwand - Bio-Methanol.....	70
7.1	Wirtschaftliche Machbarkeit.....	70
7.2	Politische und öffentliche Machbarkeit.....	71
7.3	Organisatorische Machbarkeit	72
7.4	Ressourcenbezogene Machbarkeit.....	73
8.	Konzept 3: Das Beste aus zwei Welten - Hybrid	77
8.1	Wirtschaftliche Machbarkeit.....	77
8.2	Politische und öffentliche Machbarkeit.....	80
8.3	Organisatorische Machbarkeit	81
8.4	Ressourcenbezogene Machbarkeit.....	82
9.	Fazit und Handlungsempfehlung.....	85
10.	Anhang.....	86
10.1	Ergebnisse Befragungen.....	86
10.2	Ergebnisse ZukunftsWerkStadt.....	87
10.3	Ergebnisse Reallabor.....	88
10.5	Aufschlüsselung Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	89
10.6	Wartezeitanzeige als Webanwendung / App.....	90
10.7	Wartezeitanzeige auf der B42	91
10.8	Echtzeit-Videoübertragung der Wartesituation	92

10.9	Vorregistrierung der Kunden in Randzeiten und Vergabe von Fahrzeitfenstern für Randzeiten.....	93
10.10	Weiträumige Anzeigetafeln zur Fahrsituation	94
10.11	Lückenlose Netzabdeckung.....	95
10.12	Einweisungsunterstützung per LED.....	96
	Glossar.....	97
	Literaturverzeichnis.....	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umfang der Well-to-Wake Analyse	15
Abbildung 2: Farbklassifizierung von Wasserstoff nach den zur Herstellung verwendeten Primärenergieträgern.....	21
Abbildung 3: Aufbau verschiedener Hybride	27
Abbildung 4: CO ₂ -Emission der verschiedenen Treibstoffalternativen.....	36
Abbildung 5: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte der Treibstoffalternativen	44
Abbildung 6: Zusammenfassung der Ausschlussgründe für die betrachteten Antriebstechnologien.....	55
Abbildung 7: Darstellung der Freiräume auf der Fähre Linz-Remagen	68
Abbildung 8: Verursachte CO ₂ -Emissionen in Tonnen pro Jahr - Wasserstoff.....	69
Abbildung 9: Darstellung der Freiräume auf der Fähre Linz-Remagen	75
Abbildung 10: Verursachte CO ₂ -Emissionen in Tonnen pro Jahr - Bio-Methanol .	76
Abbildung 11: Aufbau eines seriellen Hybriden.....	77
Abbildung 12: Darstellung der Freiräume auf der Fähre Linz-Remagen	83
Abbildung 13: Verursachte CO ₂ -Emissionen in Tonnen pro Jahr - Hybride.....	84
Abbildung 14: Bedarfe und Projektvorschläge aus der AkteurInnenbefragung...	86
Abbildung 15: Bedarfe und Projektvorschläge aus der BürgerInnenbefragung ..	86
Abbildung 16: ZukunftsWerkStadt - Diskussion der Digitalisierungs-Teilmaßnahmen	87
Abbildung 17: ZukunftsWerkStadt - Diskussion möglicher technischer Teilmaßnahmen	87
Abbildung 18: Reallabor - Einordnung potenzieller Digitalisierungsmaßnahmen	88
Abbildung 19: Detaillierte Aufschlüsselung der Wirtschaftlichkeitsrechnung	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kohlenstoffdioxidemission der verschiedenen Treibstoffe.....	37
Tabelle 2: Auswirkungen der Treibstoffalternativen auf die vorhandene Infrastruktur.....	39
Tabelle 3: Dimensionierung der Tanks für die verschiedenen Treibstoffalternativen bei gleichbleibenden Betankungszyklen - Fährer Linz-Remagen	46
Tabelle 4: Dimensionierung der Tanks für die verschiedenen Treibstoffalternativen bei gleichbleibenden Betankungszyklen - Fährer St. Johannes.....	47
Tabelle 5: Untere und obere Grenze für die Gesamtkosten der jeweiligen Treibstoffalternativen	48
Tabelle 6: Technische Daten der Treibstoffalternativen	52
Tabelle 7: Berechnung der oberen und unteren Grenze der Gesamtkosten - Wasserstoff	63
Tabelle 8: Jährliche Gesamtkosten für verschiedene Treibstoffkosten - Wasserstoff	64
Tabelle 9: Berechnung der oberen und unteren Grenze der Gesamtkosten - Bio-Methanol	71
Tabelle 10: Berechnung der oberen und unteren Grenze der Gesamtkosten - Hybride (Strom/MGO).....	79

Abkürzungsverzeichnis

0	Bedeutung
€	Euro
°C	Grad Celsius
AG	Aktiengesellschaft
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
CCS	Carbon Capture and Storage – Kohlenstoffabscheidung und Speicherung
CCU	Carbon Capture and Utilization – Kohlenstoffabscheidung und Nutzung
CEO	Chief Executive Officer - Geschäftsführer
cm	Zentimeter
CNG	Compressed Natural Gas – komprimiertes Erdgas
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
GHG	Greenhouse Gas Protocol
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HFO	Heavy Fuel Oil, Schweröl Treibstoff
IGC	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk – Internationale Richtlinie für den Bau und Ausstattung von Schiffen zur Beförderung verflüssigter Gase
IGF	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels - Internationaler Sicherheitskodex für Schiffe, die Gase oder andere Brennstoffe mit niedrigem Flammpunkt verwenden
IMO OSV Chemical Code	International Maritime Organization Offshore Supply Vessels Chemical Code – Internationale Maritime Organisation Hochseetransportschiffe Chemie Richtlinie
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau

Kg	Kilogramm
Km	Kilometer
kW	Kilowatt
l	Liter
LED	Light Emitting Diode – Licht emittierende Diode
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas - Flüssigerdgas
LPG	Liquefied Petroleum Gas, Flüssiggas Treibstoff
m ³	Kubikmeter
MeOH	Methan
MGO	Marine Gas Oil – Marine Gasöl
MJ	Mega Joule
MVP	Minimum Viable Product - minimal brauchbares oder existenzfähiges Produkt
MW	Mega Watt
MWh	Megawattstunde
OT	Ortsteil
PEM	Proton exchange Membran - Protonen Austauschmembran
PKW	Personenkraftwagen
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea - Internationales Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See
t	Tonne
US	United States
USD	US-Dollar
WLAN	Wireless Local Area Network – Drahtloses lokales Netzwerk
WTW	Well-to-Wake

1. Einleitung

1.1. Hintergrund

Die Stadt Linz am Rhein und die Verbandsgemeinde Linz am Rhein wurden im Jahr 2021 als eines von 28 „Modellprojekten Smart Cities“ für die dritte Förderstaffel ausgewählt. Mit diesen Modellprojekten fördert das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) gemeinsam mit der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) einen strategischen Umgang mit den neuen Möglichkeiten und Herausforderungen, die sich durch die Digitalisierung für die Stadt- bzw. Regionalentwicklung ergeben.

Das Projekt unterteilt sich in zwei Phasen: Strategie- und Umsetzungsphase. Die fünf definierten Maßnahmen (Partizipatives Linz verbindet, Smarte Bürgerservices verbinden, Inter-/Multimodale Mobilität verbindet, Smartes Gesundheitswesen verbindet, Smarte & klimaresiliente Stadtentwicklung verbindet) bilden erste Leitplanken, die für eine zukunftsfähige Entwicklung von Stadt und Verbandsgemeinde erforderlich sind. Innerhalb dieser Leitplanken wurden gemeinsam mit den Bürgerinnen und Bürgern sowie allen weiteren wichtigen AkteurInnen (Rheinfähre Linz-Kripp GmbH, Einzelhandel, medizinische Leistungserbringenden, Vereine, Verbände, etc.) aktiv Themenfelder, Ideen und mögliche Teilmaßnahmen gesammelt und bewertet. Als Modellprojekt besteht die Möglichkeit, Ideen, die die Region nachhaltig nach vorne bringen, anzustoßen, zu erproben, kritisch zu hinterfragen und weiterzuentwickeln.

Die Rheinfähre stellt die direkte Mobilitätsverbindung zwischen den Orten Linz am Rhein und Remagen OT Kripp dar, welche alternativ nur über die jeweils 10 km entfernten Fährverbindungen bei Bad Hönningen und Bad Honnef, oder über die jeweils ca. 25 km entfernten Brücken bei Bonn und Neuwied möglich sind. Somit ist die Fährverbindung ein besonderes und verbindendes Element der örtlichen Infrastruktur. Auf Grund dieser besonderen Stellung für die Region befasst sich ein Schwerpunkt innerhalb der Maßnahme „Inter-/Multimodale Mobilität verbindet“ mit der Machbarkeitsanalyse einer emissionsarmen Rheinfähre.

1.2. Ziel und Zweck des Vorhabens

In dieser Machbarkeitsstudie wurden emissionsmindernde Ansätze bezogen auf die beiden Fähren Sankt Johannes und Linz-Remagen auf ihre Machbarkeit hin untersucht. Der Fokus lag hierbei auf technologischen Umbaumaßnahmen, wie der Prüfung alternativer Antriebstechnologien, die so einen direkten Einfluss auf die Reduktion der Emissionen haben und Digitalisierungsteilmaßnahmen, die durch Prozessoptimierungen die Möglichkeit zur Emissionsreduktion bieten. So sollte durch diese Studie das gesamte Potential der Emissionsreduktion durch die

eben genannten Vorhaben bezüglich der Fähre und der für ihren Betrieb notwendigen vor- und nachgelagerten Prozesse geprüft werden. Hierbei werden zunächst neben der Emissionsreduktion auch die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit der verschiedenen Antriebskonzepte untersucht. Danach wurden die Top 3 Konzepte detaillierteren Untersuchungen unterzogen bezüglich ihrer wirtschaftlichen, politisch/öffentlichen, organisatorischen und ressourcenbezogenen Machbarkeit. Die Prüfung der beiden Schwerpunkte – Digitalisierung und alternative Antriebstechnologien – erfolgte unabhängig voneinander.

1.3. Ausgangslage

1.3.1 Beschreibung der Fähren

Die Personen- und Autofähre Linz-Remagen und die Fähre Sankt Johannes sind für den Rheinfährbetrieb zwischen Linz und Remagen zuständig. Sie fahren während der Betriebszeiten täglich von 05:15 – 24:00 Uhr im Pendelverkehr ohne festen Fahrplan. In Folge des partizipativen Prozesses wurden die Betriebszeiten von ursprünglich von 06:00 – 24:00 nach vorne hin erweitert.

Ausnahmen des täglichen Betriebs bilden höhere Gewalt wie Hochwasser, Eisgang, Unwetter, Behinderungen durch die Schifffahrt und Maschinen- und Schiffschäden. In der Regel ist nur eine der beiden Fähren aktiv. Als Hauptfähre dient die neuere und größere Personen- und Autofähre Linz-Remagen. Zu ausgewählten Tagen und Tageszeiten wird die Verbindung auch im Doppelfährbetrieb befahren.

Die Personen- und Autofähre Linz-Remagen wurde 2014 von der Rheinfähre Linz-Kripp GmbH in Betrieb genommen und ist seit diesem Zeitpunkt im Einsatz. Durch die vier Schottel Pumpjets, angetrieben von MAN Motoren des Typs D2866LXE47 mit jeweiliger Leistung von 221 kW, ist das 61 Meter lange und fast 17 Meter breite Fährschiff sehr manövrierfähig und rheinstrom-fit. Der Antrieb über die Pumpjets und der hieraus resultierende niedrige Tiefgang von rund 95 cm gewährleistet auch bei niedrigeren Wasserständen eine lange Fährbetriebszeit über das Jahr. Zusätzlich zu den vier MAN Motoren verfügt die Fähre über zwei wechselseitig laufende 6-Zylinder Dieselgeneratoren mit jeweils 129 kW Leistung aus dem Jahr 2014, die für die Bordstromversorgung, das Laden der Bordnetz- und Starterbatterien und auch den Betrieb der Hydraulikpumpen der Auf- und Abfahrtsrampen zuständig sind. Die Motoren und Dieselgeneratoren werden zentral über den Haupttank mit Marine Gas Oil (MGO) versorgt. Bei täglichem Einsatz der Fähre muss diese alle 14 bis 16 Tage mit 12.000 l MGO betankt werden. Der Durchschnittsverbrauch der Personen- und Autofähre Linz-Remagen beträgt 900 l MGO am Tag nach Aussage des Fährbetreibers. Der tatsächliche tägliche Verbrauch der Fähre ändert sich in Abhängigkeit von Wasserstand,

Wetterbedingungen und Auslastung. Die Fähre hat eine Tragfähigkeit von ca. 150 t und ermöglicht so den Transport von bis zu 600 Fahrgästen bzw. 40 PKWs und Landfahrzeugen bis zu 45 t. In der Regel wird die Personen- und Autofähre Linz-Remagen für den täglichen Betrieb eingesetzt.

Die Fähre Sankt Johannes, mit Baujahr 1997, wird entweder bei stark erhöhtem Verkehrsaufkommen zusätzlich in Betrieb genommen oder ersetzt bei mangelnder Verfügbarkeit die Personen- und Autofähre Linz-Remagen komplett. Sie wird von vier MAN Motoren des Typs D2866LXE47, mit einer Leistung von 177 kW pro Motor, durch Schottel Pumpjets angetrieben und kann auf einer Länge von 56 m und einer Breite von 17 m eine Tragfähigkeit von 150 t vorweisen. So ermöglicht sie bei jeder Fahrt das Übersetzen von bis zu 600 Personen bzw. 30 PKWs und Landfahrzeugen bis 45 t über den Rhein. Die Fähre Sankt Johannes verfügt über zwei wechselseitig laufende 4-Zylinder Dieselgeneratoren zur Bordstromversorgung mit Baujahr 1997. Auch auf der Fähre Sankt Johannes werden Dieselgeneratoren und Motoren aus einem zentralen Tank mit MGO versorgt. Derzeit wird diese Fähre ca. alle drei Wochen mit 12.000 l MGO betankt. Laut Fährbetreiber hat die Fähre Sankt Johannes bei täglichem Betrieb einen durchschnittlichen Verbrauch von 600 l MGO am Tag. Der tatsächliche tägliche Verbrauch der Fähre ändert sich ebenfalls in Abhängigkeit von Wasserstand, Wetterbedingungen und Auslastung.

Beide Schiffe müssen alle 500 bis 600 Betriebsstunden gewartet werden. Bei einer Wartung werden Kraftstofffilter, Vor-Kraftstofffilter, Ölfilter und Motoröl ausgetauscht. In jedem zweiten Wartungssturnus müssen zusätzlich die Luftfilter ausgetauscht und die Ventile neu eingestellt werden. Zusätzlich erfolgt ein Mal im Jahr ein Ölwechsel an den Schottel Pumpjets der beiden Fähren. Zweimal im Jahr wird das Getriebeöl gewechselt.

1.3.1 Prozess aus KundInnen­sicht

Von der Linzer Rheinseite aus gelangen die KundInnen über die B42 aus Richtung Erpel oder Leubsdorf zum Fähranleger. Es gehen zwei Spuren von der B42 die an der Rampe in die B266 übergeht auf die Rampe ab. PKWs, Motorräder, LKWs und weitere Fahrzeuge warten auf der Rampe und den zugehörigen Spuren auf die Fähre. FußgängerInnen und FahrradfahrerInnen warten auf dem hierfür vorgesehen Bordstein auf der Rampe. Legt die Fähre auf der Linzer Seite an, fahren alle Fahrzeuge, die sich zu diesem Zeitpunkt auf der Fähre befinden, von Bord über die B266 ab. Ist der Ausschiffungsprozess abgeschlossen und sind auch FußgängerInnen und RadfahrerInnen über den Bordstein der Rampe an Land gegangen, beginnt der Einschiffungsprozess. Die Fahrzeuge fahren nacheinander an Bord und werden vom Einweisungspersonal an Deck der Fähre positioniert. Zeitgleich beginnen die KassiererInnen den KundInnen die für die Überfahrt

benötigten Tickets auszustellen und die hiermit verbundenen Bezahlvorgänge abzuwickeln. Dies ist besonders zu Stoßzeiten essenziell, da die Fähre hier im permanenten Pendelbetrieb zwischen den beiden Rheinseiten fährt und die Zeit für den Kassivorgang deshalb stark begrenzt ist. Außerhalb der Stoßzeiten, bei geringerer Auslastung, wartet die Fähre wenige Minuten auf weitere kommende Fahrzeuge. Die Wartezeit richtet sich hier nach Ermessen des/der SchiffsführerIn. Diese beobachten permanent die den Rhein passierenden Schiffe, aber auch die Situation auf der gegenüberliegenden Remagener Seite, um den NutzerInnen möglichst kurze Wartezeiten zu ermöglichen. Vor dem Ablegen übermittelt eine Ampel neben der Auffahrt der Fähre die Information, dass von weiterem Auffahren abzusehen ist und die Fährschranken werden verschlossen. Im Anschluss werden die Fähr Rampen mittels der hierfür verbauten Hydraulik hochgefahren. Die Überfahrt über den dort ca. 350m breiten Rhein dauert ca. 3 Minuten. Die Überfahrtszeit schwankt leicht in Abhängigkeit des Rheinpegels. Nach der Überquerung des Rheins und dem Anlegen auf der Remagener Seite beginnt der Ausschiffungsprozess. Die übergesetzten Fahrzeuge fahren über die Rampe auf die B266 auf der Remagener Rheinseite von der Fähre ab. Der Prozess von Remagen zurück nach Linz am Rhein läuft analog ab.

2. Methodik

1.3 Beschreibung der Bewertungskriterien

Diese Studie prüft die Machbarkeit verschiedener emissionsreduzierender Ansätze in Bezug auf die von der Rheinfähre Linz-Kripp GmbH betriebenen Fähren Sankt Johannes und die Personen- und Autofähre Linz-Remagen. Hierbei liegen die Schwerpunkte auf der Prüfung der Machbarkeit anderer Antriebstechnologien sowie verschiedener Digitalisierungskonzepte.

Dabei wird in Kapitel 3 das breite Feld an möglichen Antriebskonzepten und Treibstoffalternativen kurz erläutert und klassifiziert.

In Kapitel 4 werden die betrachteten Konzepte hinsichtlich ihres möglichen Emissionsminderungspotentials, des geschätzten Aufwands für eine mögliche Nachrüstung, eines Umbaus oder der Notwendigkeit einer Neuanschaffung, der Betrachtung der vor- und nachgelagerten Infrastruktur sowie ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht. Nach jeder Betrachtungsstufe werden Treibstoffalternativen oder Antriebskonzepte, die in der jeweilig untersuchten Dimension unpraktikabel erscheinen, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die Untersuchung bewertet den aktuellen Fährbetrieb und mögliche Antriebsalternativen, bezogen auf die approximierten Emissionswerte, in Form einer Well-to-Wake (WTW) Analyse¹. Hieraus ergibt sich eine Emissionsanalyse des zweiten Scopes und zu Teilen des dritten Scopes nach dem GHG Protocol*. Das bedeutet, es wird nicht nur der Emissionsausstoß, der durch die Verbrennung des Treibstoffs auf den Fähren entsteht, betrachtet, sondern es werden auch Emissionen berücksichtigt, die durch die Förderung, die Erzeugung und den Transport der verschiedenen Treibstoffe anfallen. Nachrüstung, Umbau und Neuanschaffung werden bezüglich des approximierten Arbeits- und Umbaufwands und der möglichen Integration in die bestehenden Antriebskomponenten bewertet. Dieser Ansatz ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Untersuchung der vor- und nachgelagerten Infrastruktur erläutert und bewertet die Folgen für den operativen Betrieb, die aus der jeweilig betrachteten alternativen Antriebstechnologie resultieren. Die Wirtschaftlichkeitsprüfung vergleicht abschließend die bis hierhin favorisierten Alternativen über die Kosten pro vermiedener Tonne CO₂. Die drei relevantesten Alternativen bilden dann die Top 3 Varianten.

Kapitel 5 beschreibt die verschiedenen Teilmaßnahmen bezogen auf Digitalisierungsmöglichkeiten. Auch hier liegt der Fokus auf der Emissionsreduktion.

¹ Diese Begriffe werden im Glossar weiter erläutert

Diese Emissionsreduktion wird primär durch eine Effizienzsteigerung, wie zum Beispiel eine Auslastungserhöhung, herbeigeführt.

Die Kapitel 6 bis 8 beschäftigen sich näher mit den in Kapitel 4 identifizierten Top 3 Varianten. In Kapitel 9 wird ein abschließendes Fazit gezogen und eine Handlungsempfehlung ausgesprochen.

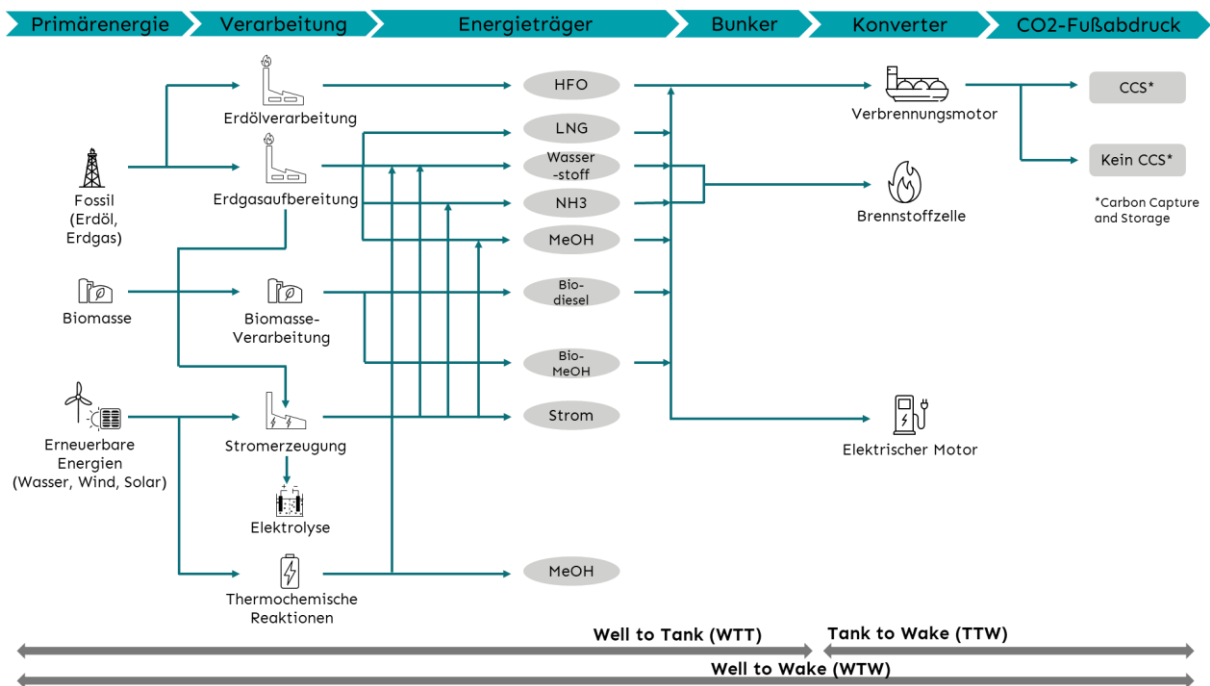


Abbildung 1: Umfang der Well-to-Wake Analyse²

² In Anlehnung an: Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“.

1.4 Partizipativer Ansatz

Die Machbarkeitsstudie ist im Projekt „Smarte Region Linz verbindet“ in der Maßnahme „Inter-/Multimodale Mobilität verbindet“ angesiedelt. Der partizipative Ansatz wurde, wie auch im Gesamtprojekt, in diesem Maßnahmenschwerpunkt durchgeführt. In der Auftaktveranstaltung am 12.05.2022 in Linz am Rhein wurde die Idee der „Machbarkeitsstudie Emissionsarme Fähre“ zum ersten Mal der breiten Bürgerschaft vorgestellt. Hier wurden erste Denkanstöße vorgetragen, um den Anwesenden aufzuzeigen, welche Betrachtungsfelder als Ansatzpunkte identifiziert wurden. Zusätzlich wurde eine Reihe von Beispielen anderer emissionsarmer Fährprojekte vorgestellt. Am darauffolgenden Tag, dem 13.05.2022, wurde von zwei Mitarbeitenden der Exxeta AG eine Befragung der FährnutzerInnen vor Ort vorgenommen. Bei der Umfrage wurden zwischen 11:30 Uhr und 15:00 Uhr 39 NutzerInnen zu ihrem Nutzungsverhalten, ihrer Zahlungsbereitschaft und Verbesserungsvorschlägen im Fährbetrieb befragt. Aus dieser Befragung wurden weitere Ideen der FährnutzerInnen bezogen auf diese Studie übernommen. Im weiteren Verlauf des Projekts Smarte Region Linz wurden im Anschluss an die Auftaktveranstaltung Online-Fragebögen zum weiteren Ausbau der BürgerInnenpartizipation auf der Webseite der Stadt Linz am Rhein zur Verfügung gestellt. In einem dieser Online-Fragebögen, der von 86 TeilnehmerInnen ausgefüllt wurde, wurden im Rahmen der Maßnahme „Inter-/Multimodale Mobilität verbindet“ weitere BürgerInnenbefragungen durchgeführt und Verbesserungsvorschläge aufgenommen sowie Probleme erfasst. In der ZukunftsWerkStadt, welche am 29.06.2022 stattfand, setzte sich der partizipative Ansatz fort. Hier hatten die BürgerInnen nach einer kurzen Vorstellung der Maßnahme und der bis zu diesem Zeitpunkt gesammelten Informationen die Möglichkeit, einzelne Schwerpunkte in Kleingruppen zu diskutieren. Bezogen auf die Machbarkeitsanalyse Emissionsarme Fähre drehte sich die Diskussion zwar primär um verschiedene gewünschte Digitalisierungsangebote, es fielen allerdings auch einige Wortmeldungen, die Bezug auf die alternativen Antriebstechnologien nahmen.

Das darauffolgende Reallabor, ein partizipativer Workshop, fand am 13.09.2022 in Linz am Rhein statt. In diesem Zuge wurden die angedachten Digitalisierungsteilmaßnahmen mit den BürgerInnen diskutiert und auf Basis der Diskussion der Teilnehmenden weitere Teilmaßnahmen abgeleitet. Die Gesamtheit der Teilmaßnahmen wurde zum Abschluss hinsichtlich Attraktivität und vermutetem Aufwand eingeschätzt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Befragungen, der ZukunftsWerkStadt sowie des Reallabors sind im Anhang zu finden.

3. Ideen/Varianten und Ansätze zur möglichen Emissionsminderung

Das folgende Unterkapitel stellt eine Vielzahl verschiedener alternativer Treibstoffe vor, die sich in der Schifffahrtsindustrie unterschiedlichen Verbreitungsreichweiten und Entwicklungsstadien befinden. Im Folgenden wird explizit auf die Erzeugung, die Zusammensetzung, den Transport, die Energiedichte und die zu beachtenden Besonderheiten der verschiedenen Alternativen eingegangen. Die betrachteten Treibstoffe lassen sich in vier Übergruppen klassifizieren: fossile Treibstoffe, synthetische Treibstoffe, biologische Treibstoffe und Sonderkonzepte. Durch die im Folgenden besprochenen alternativen Treibstoffe lässt sich ein hohes Emissionsminderungspotential erschließen.

3.1 Fossile Treibstoffe

3.1.1 LNG als Treibstoff / Dual-Fuel Motor

LNG (Liquified Natural Gas) ist aufbereitetes, durch Kühlung verflüssigtes fossiles Erdgas und somit der Klasse der fossilen Treibstoffe zuzuordnen. Während der Aufbereitung wird das Erdgas, das in der Regel aus einer Mischung aus Methan, schwereren Kohlenwasserstoffen, Kohlenstoffdioxid, Wasser, Stickstoff und Schwefelverbindungen besteht, zu nahezu reinem Methan reduziert. Dieses wird im Anschluss zur Verflüssigung in mehreren Stufen auf eine Temperatur von -162 °C heruntergekühlt. In seinem flüssigen Zustand nimmt LNG ca. 1/600 seines Gasvolumens ein³. LNG hat einen Heizwert von 48,62 MJ/kg, einen Brennwert⁴ von 55,19 MJ/kg und bei -162 °C eine Dichte von 450 kg/m³. Um Schiffsbetreibern den Umstieg von MGO oder HFO (Heavy Fuel Oil) zu LNG zu erleichtern, wurden sogenannte Dual-Fuel Motoren entwickelt. LNG-Dual-Fuel Motoren können sowohl Schiffsdiesel als auch LNG als Brennstoff verwenden. Hierbei werden allerdings immer noch kleine Mengen von Diesel zur Selbstzündung des Gemischs benötigt.⁵

3.1.2 LPG als Treibstoff / Dual-Fuel Motor

LPG (Liquified Petroleum Gas) ist eine Mischung aus Propan und Butan in flüssiger Form. Durch die deutlich höheren Siedepunkte von Butan und Propan verglichen zu Methan, lässt es sich im Verhältnis zu LNG einfacher lagern und transportieren. LPG wird industriell auf drei verschiedene Arten transportiert; entweder bei -50°C

³ Hermeling, Handbuch für den LNG- und CNG-Praktiker, 1f.

⁴ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

⁵ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 5.

und zwischen 1 und 2 Bar Druck, bei -10 °C und 4 bis 8 Bar Druck oder bei bis zu 45 °C und 17 Bar Druck. LPG ist ein Nebenprodukt der Erdölraffinierung und der Förderung von Erdgas und Erdöl. Deshalb lässt es sich in die Klasse der fossilen Treibstoffe einordnen. Es wird nicht durch Pipelines, sondern über Seeschiffe, Binnenschiffe, und Straßentankwagen zum jeweiligen Endverbraucher transportiert.⁶ In seinem verflüssigten Zustand nimmt es ca. 1/260 seines Gasvolumens ein. LPG hat einen Heizwert von 46,60 MJ/kg, einen Brennwert⁷ von 50,14 MJ/kg und bei 20°C und Überdruck eine Dichte von 540 kg/m³. Ähnlich wie beim Treibstoff LNG wurden für den einfacheren Umstieg auf LPG Dual Fuel Motoren entwickelt. Diese können das Schiff sowohl mit Schiffsdiesel als auch mit LNG antreiben.

3.1.3 Graues Methanol als Treibstoff

Graues Methanol wird großindustriell über ein zweistufiges katalytisches Verfahren aus Synthesegas, einem Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid, im Verhältnis von etwa 2:1 hergestellt. Dieses Synthesegas kann über Dampfreformation oder partielle Oxidation aus Kohle und Erdgas gewonnen werden. Wurde zu seiner Herstellung auf fossile Energieträger zurückgegriffen, handelt es sich bei Methanol um einen fossilen Kraftstoff. Der Treibstoff ermöglicht den Dual-Fuel Betrieb zusammen mit Diesel in Verbrennungsmotoren. Ein Vorteil des Treibstoffes ist, dass er entweder durch Vorschalten eines Reformers in einer PEM-Brennstoffzelle oder in einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle verwendet werden kann.⁸ Graues Methanol hat einen Heizwert von 20,09 MJ/kg, einen Brennwert⁹ von 22,88 MJ/kg und bei 20 °C eine Dichte von 790 kg/m³.

3.1.4 Grauer, brauner und schwarzer Wasserstoff als Treibstoff

Zur Herstellung von Wasserstoff gibt es unterschiedliche Verfahren. Vorwiegend wird Wasserstoff aus fossilen Energieträgern hergestellt. Großindustriell wird er durch Dampfreformierung aus Erdgas oder durch Kohlevergasung aus Braunkohle oder Steinkohle gewonnen. Die chemischen Eigenschaften von Wasserstoff sind unabhängig vom Herstellungsverfahren. Je nach Verfahren und Primärenergieträger, welche zur Herstellung von Wasserstoff zum Einsatz kommen, ergänzt man jedoch eine spezifische Farbkennungen. Eine Übersicht ist

⁶ „Herkunft und Entstehung von Flüssiggas – der DVFG informiert - Deutscher Verband Flüssiggas e.V.“

⁷ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

⁸ Voss, „Hydrogen as ship-fuel“, 16.

⁹ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

in Abbildung 2 zu finden. So spricht man von grauem Wasserstoff, wenn dieser auf Basis von Erdgas gewonnen wird, von braunem Wasserstoff, wenn dieser auf Basis von Braunkohle gewonnen wird und von schwarzem Wasserstoff, wenn er auf Basis von Steinkohle produziert wird. Bei der Herstellung von Wasserstoff nach diesen Verfahren werden CO₂-Emissionen freigesetzt. Physikalisch gesehen lässt sich das Endprodukt nicht von den anderen Wasserstofftypen unterscheiden. Der Anteil an Wasserstoff hergestellt aus fossilen Brennstoffen beträgt laut dem US-Energieministerium 95%.¹⁰ Durch seine geringe Molekülgröße, seine niedrige volumenbezogene Energiedichte und die hohen Energiemengen, die zur Speicherung benötigt werden, bedarf die Aufbewahrung von Wasserstoff spezieller technischer Lösungen. Wasserstoff in seiner Reinform wird industriell in Form von Druckwasserstoff oder Flüssigwasserstoff als Treibstoff genutzt. Übliche Verdichtungsdrücke von Wasserstoff befinden sich zwischen 200 und 900 Bar¹¹. Der für eine Verdichtung auf 700 Bar benötigte Energieaufwand beträgt etwa 15% des Heizwerts des Wasserstoffs¹². Flüssigwasserstoff besitzt eine deutlich höhere Energiedichte, muss allerdings zur Verflüssigung auf -252,88 °C heruntergekühlt werden. Die hierfür benötigte Arbeit beträgt je nach Menge und Verfahren zwischen 28% und 46% des Energieinhaltes des Wasserstoffs.¹³ Trotz seines sehr hohen Brennwertes von 141,88 MJ/kg und eines Heizwertes¹⁴ von 119,96 MJ/kg hat Wasserstoff durch seine physikalischen Eigenschaften selbst im flüssigen, tiefkalten Zustand eine sehr geringe Dichte von 71 kg/m³ und damit eine deutlich niedrigere Energiedichte als MGO.

3.1.5 Blauer Wasserstoff als Treibstoff

Ähnlich wie grauer Wasserstoff wird blauer Wasserstoff aus Erdgas mittels Dampfreformation gewonnen. Durch die Verwendung von Carbon Capture and Storage (CCS) bzw. Utilization (CCU) Verfahren, werden weniger CO₂-Emissionen freigesetzt, weshalb blauer Wasserstoff deutlich emissionsärmer ist. Durch den Einsatz von CCS und CCU wird das angefallene Kohlendioxid und Kohlenmonoxid gespeichert oder verwertet. Da bei CCS-Technologien trotzdem Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert werden, kann blauer Wasserstoff lediglich als kohlenstoffdioxidarm und nicht als kohlenstoffdioxidneutral bezeichnet werden. Blauer Wasserstoff wird in erster Linie als Brückentechnologie hin zu grünem Wasserstoff und wird nicht als langfristige, nachhaltige Lösung gesehen¹⁵.

¹⁰ CO₂ Und CO – Nachhaltige Kohlenstoffquellen Für Die Kreislaufwirtschaft, 18ff.

¹¹ Voss, „Hydrogen as ship-fuel“, 7.

¹² Voss, 10ff.

¹³ Voss, 11.

¹⁴ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

¹⁵ Horng und Kalis, „Wasserstoff - Farbenlehre Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie“, 8ff.

Physikalisch gesehen lässt sich das Endprodukt nicht von den anderen Wasserstofftypen unterscheiden. Deshalb hat blauer Wasserstoff den gleichen Brennwert von 141,88 MJ/kg und Heizwert¹⁶ von 119,96 MJ/kg wie grauer Wasserstoff.

3.1.6 Blaues Ammoniak als Treibstoff

Blaues Ammoniak wird über das Haber-Bosch-Verfahren unter Verwendung von blauem Wasserstoff hergestellt. Der hierfür nötige Stickstoff wird durch kryogene Luftzerlegung bereitgestellt. Da bei der Herstellung des Wasserstoffs CCS- und CCU-Verfahren zur Abscheidung des bei der Produktion entstehenden CO₂ angewandt werden, handelt es sich bei blauem Ammoniak ebenfalls um einen emissionsarmen und nicht um einen emissionsfreien Treibstoff. Ammoniak ist ein Wasserstoffträgermaterial. Deshalb ist der Betrieb sowohl mit einem Verbrennungsmotor als auch mit einer Brennstoffzelle denkbar.¹⁷ Um Ammoniak in flüssiger Form zu speichern, muss es entweder unter Druck gesetzt (8 Bar bei Raumtemperatur) oder auf -33 °C gekühlt werden¹⁸. Es hat einen Heizwert von 18,89 MJ/kg, einen Brennwert¹⁹ von 22,50 MJ/kg.

¹⁶ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

¹⁷ Cames, Wissner, und Sutter, „Ammonia as a marine fuel – risks and perspectives“, 10ff.

¹⁸ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 6.

¹⁹ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.


	Gold	Überschüssiger Grünstrom + Wasser	
		Elektrolyse	
		CO ₂ -frei	
	Grün	Grünstrom + Wasser	
		Elektrolyse	
		CO ₂ -frei	
	Weiß	Abfallprodukt chem. Verfahren	
Chem. Industrieprozesse			
CO ₂ in chem. Produkten gebunden			
Orange	Biomasse + Strom aus Abfallverwertung		
	Reformierung		
	CO ₂ -neutrale; unvermeidbare Emissionen		
Blau	Erdgas + Wasserdampf		
	Reformierung		
	CO ₂ -arm, CCS		
Türkis	Methan		
	Pyrolyse		
	Fester Kohlenstoff, CO ₂ im Prozess		
Grau	Erdgas + Dampf	Graustrom + Wasser	
	Reformierung	Elektrolyse	
	CO ₂ bei Reformierung	bei Stromgestehung	

Abbildung 2: Farbklassifizierung von Wasserstoff nach den zur Herstellung verwendeten Primärenergieträgern

3.2 Synthetische Treibstoffe

3.2.1 Grünes synthetisches LNG als Treibstoff

Grüner synthetischer Wasserstoff, hergestellt durch erneuerbare Energien, bildet die Grundlage der Produktion von grünem synthetischen LNG. Dieser Wasserstoff wird durch Methanisierung unter Nutzung von grünem Strom zu grünem Methan weiterverarbeitet. Nach Verflüssigung dieses Methans entsteht grünes synthetisches LNG, das fossiles LNG technisch vollständig ersetzen kann²⁰. Bei bisherigem Betrieb mit LNG sind weder neue Infrastruktur oder neue Bunkeranlagen noch eine zusätzliche Ausbildung der Besatzung notwendig²¹.

²⁰ Köhler u. a., „Teilstudie “Studie über die Marktreife von Erdgasmotoren in der Binnen-und Seeschifffahrt““, 13f.

²¹ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 6.

Unter der Annahme der starken Ähnlichkeit zu fossilem LNG auf chemischer Ebene wird angenommen, dass grünes synthetisches LNG wie fossiles LNG einen Heizwert von 48,62 MJ/kg und einen Brennwert²² von 55,19 MJ/kg hat.

3.2.2 Grüner synthetischer Wasserstoff als Treibstoff

Grüner synthetischer Wasserstoff wird mithilfe von Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen. Physikalisch gesehen lässt sich das Endprodukt nicht von den anderen Wasserstofftypen unterscheiden. Durch die Elektrolyse wird Wasser unter Stromzufuhr in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Der so erzeugte CO₂-freie grüne synthetische Wasserstoff ist gasförmig und kann in die bestehende Gas-Infrastruktur eingespeist oder gespeichert werden. Da grüner synthetischer und grauer Wasserstoff chemisch identisch sind, ist auch bei grünem Wasserstoff auf die höheren technischen Anforderungen der Speicherung und des Transports zu achten. Grüner synthetischer Wasserstoff hat den gleichen Brennwert wie Wasserstoff anderer Farben von 141,88 MJ/kg und den gleichen Heizwert²³ von 119,96 MJ/kg.

3.2.3 Grünes synthetisches Ammoniak als Treibstoff

Grünes synthetisches Ammoniak wird mit Hilfe von grünem Elektrolysewasserstoff unter Verwendung des Haber-Bosch-Prozesses hergestellt. Der hierfür nötige Stickstoff wird durch kryogene Luftzerlegung bereitgestellt. Grünes synthetisches Ammoniak ist chemisch gesehen der gleiche Stoff wie blaues Ammoniak. Deshalb ist wie bei diesem der Betrieb sowohl mit einem Verbrennungsmotor als auch mit einer Brennstoffzelle denkbar.²⁴ Auch der Druck und die Temperatur, die benötigt werden, um grünes synthetisches Ammoniak in flüssiger Form zu speichern, sind identisch. So muss es entweder unter Druck gesetzt (8 Bar bei Raumtemperatur) oder auf -33 Grad Celsius gekühlt werden.²⁵ Es hat wie blaues Ammoniak einen Heizwert von 18,89 MJ/kg, einen Brennwert²⁶ von 22,50 MJ/kg und bei 20 °C eine Dichte von 770 kg/m³.

²² „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

²³ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

²⁴ Cames, Wissner, und Sutter, „Ammonia as a marine fuel – risks and perspectives“, 10ff.

²⁵ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 6.

²⁶ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

3.3 Biologische Treibstoffe

3.3.1 Bio-LNG als Treibstoff

Bio-LNG wird aus Abfällen wie Mist, Gülle, Pflanzenresten, Speiseresten und aus speziell für diese Verwendung angebauten Pflanzen wie Mais und Gras gewonnen. Durch anaerobe Vergärung entsteht aus der Biomasse Biogas. Dieses wird nach Abscheidung der kalorisch unbrauchbaren Begleitgase zu Bio-Erdgas bzw. Bio-Methan weiterverarbeitet und nach anschließender Verflüssigung durch Kühlung zu Bio-LNG. Dieses aus Biomasse gewonnene Flüssiggas kommt in allen physikalischen Parametern fossilem LNG stark nahe und entspricht diesem sogar teilweise.²⁷ Somit können LNG-betriebene Motoren ohne weitere Umrüstung mit Bio-LNG betrieben werden. Ähnlich wie in Kapitel 3.2.1 wird hier aufgrund der hohen chemischen Ähnlichkeit zu konventionellem fossilem LNG von gleichen Brenn- und Heizwerten ausgegangen. Damit hätte Bio-LNG einen Heizwert von 48,62 MJ/kg und einen Brennwert²⁸ von 55,19 MJ/kg.

3.3.2 Bio-LPG als Treibstoff

Bio-LPG besteht wie klassisches Flüssiggas aus den Gasen Propan und Butan. Es entsteht überwiegend als Nebenprodukt der Herstellung von Biokraftstoffen wie beispielweise Bio-Diesel. Unter anderem durch die schlechte Skalierbarkeit, aber auch aufgrund der begrenzten Anzahl von Forschungsprojekten, wird Bio-LPG in einem zukünftigen Verkehrssystem wahrscheinlich eine untergeordnete Rolle spielen.²⁹ Es wird angenommen dass dieses aus Biomasse gewonnene Flüssiggas in allen physikalischen Parametern fossilem LPG stark nahe kommt, äquivalent zum in Kapitel 3.3.1 besprochenen Bio-LNG. Somit können LPG-betriebene Motoren ohne weitere Umrüstung mit Bio-LPG betrieben werden. Ähnlich wie in Kapitel 3.2.1 wird hier aufgrund der angenommen hohen chemischen Ähnlichkeit zu konventionellem fossilem LPG von gleichen Brenn- und Heizwerten ausgegangen. Damit hätte Bio-LPG einen Heizwert von 46,60 MJ/kg, einen Brennwert³⁰ von 50,14 MJ/kg und bei 20 °C und Überdruck eine Dichte von 540 kg/m³.

3.3.3 Bio-Methanol als Treibstoff

Für die Herstellung von Methanol werden zwei verschiedene Massenströme benötigt: ein kohlenstoffhaltiger Bestandteil und Wasserstoff. Wird als

²⁷ Hermeling, Handbuch für den LNG- und CNG-Praktiker, 2f.

²⁸ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

²⁹ Ortega u. a., „Low-Emission Alternative Energy for Transport in the EU“, 10f.

³⁰ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

kohlenstoffhaltiger Bestandteil ein nachwachsender Rohstoff genutzt und ist der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugt, ist das Erzeugnis sogenannter Bio-Methanol. Bio-Methanol wird über dasselbe zweistufige katalytische Verfahren gewonnen wie fossiles, also graues Methanol. Dabei werden die regenerativen Ausgangsstoffe in Gegenwart von Dampf und Sauerstoff durch thermische Behandlung in ein gasförmiges Gemisch umgewandelt. Anschließend wird das Gemisch gereinigt, um unerwünschte Verunreinigungen wie Teer und saure Gase zu entfernen und mit Dampf aufbereitet.³¹ Bio-Methanol hat wie graues Methanol einen Heizwert von 20,09 MJ/kg, einen Brennwert³² von 22,88 MJ/kg und bei 20 °C eine Dichte von 790 kg/m³.

3.3.4 Bio-Diesel

Bio-Diesel ist ein pflanzlicher Kraftstoff, der durch seine Gewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen zu den erneuerbaren Energieträgern zählt. Als Ausgangsstoff dienen ölhaltige Pflanzen, meist Raps. Zur Herstellung von Bio-Diesel wird zuerst das Öl aus den Pflanzen gewonnen. Darauf folgen die Umesterung durch Zugabe von Methanol und einem Katalysator und die anschließende Abtrennung des erzeugten Bio-Diesels. Rapsdiesel hat als genormter Biokraftstoff einen Heizwert von 37,52 MJ/kg, einen Brennwert³³ von 40,16 MJ/kg und eine Dichte von 880 kg/m³. In Deutschland besteht der am weitesten verbreitete Biodiesel heute zu 80% aus Rapsöl und zu 20% aus Sojaöl. Bio-Diesel wird häufig zu fossilem Diesel beigemischt, die Beimischungen werden als B5, B10 oder B20 bezeichnet, je nach Volumenanteil des Biokraftstoffs.³⁴

³¹ Liu u. a., „Is Methanol a Future Marine Fuel for Shipping?“, 3.

³² „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

³³ „Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“.

³⁴ Watter, Regenerative Energiesysteme, 264.

3.4 Sonderkonzepte

3.4.1 Scrubber (Entschwefelung)

Scrubber oder auch Gaswäscher dienen der Entschwefelung der durch die Verbrennung an Bord entstehenden Abgase. Bei der Abgasentschwefelung wird die Emission von Treibhausgasen wenig bis gar nicht reduziert. Es wird in der Fachliteratur zwischen zwei Arten von Gaswäschern unterschieden: Open-Loop Scrubber, die mithilfe von Meerwasser das Waschwasser, gereinigt oder ungereinigt, wieder in das Gewässer zurückleiten und Closed-Loop Scrubber, die das Waschwasser an Bord in Tanks sammeln. Hier sind die Aufreinigung und Abtrennung der Schadstoffe an Bord ebenfalls möglich. Scrubber werden fast ausschließlich in der Seeschifffahrt verwendet. Zusätzlich ist zu beachten, dass das Ablassen von Waschwasser aus Abgasreinigungssystemen auf allen dem allgemeinen Verkehr dienenden Binnenwasserstraßen, mit wenigen Ausnahmen, verboten ist.

3.4.2 Motorenwechsel

Insbesondere bei sehr alten Motoren kann das Konzept des Motorwechsels sinnvoll sein. Durch Weiterentwicklungen in der Motorentechnologie ist ein effizienterer und ressourcenschonenderer Betrieb selbst bei gleichem Kraftstoff möglich. Aufgrund der immensen Kosten, die mit solch einem Wechsel verbunden sind, ist es jedoch fraglich, ob bei einem Austausch nicht ein Wechsel hin zu emissionsärmeren Kraftstoffen eine sinnvollere Alternative darstellt.

3.4.3 Generatordimensionierung

Ähnlich wie beim Motorenwechsel ist es wahrscheinlich, dass ein Austausch der für den Bordstrom zuständigen Dieselgeneratoren mit einer Emissionsreduktion einhergehen würde. Grund hierfür sind maßgeblich zwei Annahmen. Zum Ersten wird angenommen, dass die Motorentechnologie weitere Fortschritte gemacht hat und somit geringe Reduktionen des Treibstoffverbrauchs und damit auch der Emissionen durch kleine Wirkungsgradsteigerungen erzielt werden können. Zum Zweiten kann davon ausgegangen werden, dass die aktuell verwendeten Aggregate wahrscheinlich überdimensioniert für den tatsächlichen operativen Betrieb sind. Wenn ein Motor perfekt für die benötigte Arbeit dimensioniert ist, dann befindet sich die Drehzahl im sogenannten „Bestpunkt“. Dieser ist der Punkt, an dem der spezifische Verbrauch an Kraftstoff des Verbrenners am geringsten bezogen auf die Umwandlung in elektrische Energie ist. Falls die Dimensionierung zu groß gewählt ist, kommt es zu einem höheren Verbrauch bei gleichem Treibstoff. Durch eine Redimensionierung ist somit eine potenzielle Emissionsminderung möglich.

3.4.4 Batteriebetrieb

Der Batteriebetrieb von Schiffen ist nur in wenigen Einzelfällen umsetzbar. Grund hierfür sind die geringen Energiedichten der Batterien, die benötigten Ladezeiten, und auch die hohen Anschaffungskosten. Insbesondere bei Kurzstrecken kann der Einsatz von Batterietechnologie dennoch sinnvoll sein. Dies ist gesondert zu untersuchen.

3.4.5 Hybrides Konzept

Hybride Antriebssysteme beziehen ihren Energiebedarf aus einer Mischung verschiedener Treibstoffe mit unterschiedlichen Antriebssystemen. Hier werden in der Regel fossile Energieträger wie Diesel oder LNG in Verbindung mit Verbrennungsmotoren und Elektromotoren über Energieträger wie Strom oder Wasserstoff unter der Verwendung von Brennstoffzellen kombiniert verwendet. Strom und Wasserstoff können hierbei aus fossilen Energieträgern gewonnen werden, oder auch aus erneuerbaren Energiequellen.

In dieser Studie wird eine Hybridisierung der Fähre in Form einer Kombination der Treibstoffe MGO und Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrachtet. Es existieren verschiedene Hybridisierungskonzepte, die sich in ihrer Anordnung von Verbrennungsmotor, Elektromotor, Generator, Batterie und Übersetzung an den Endverbraucher sowie der gewählten Form der Energieübertragung zwischen diesen unterscheiden. Die verschiedenen Auslegungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Diese Studie konzentriert sich auf die Betrachtung eines so genannten seriellen Hybridantriebs, da dieser auf der Fähre mit hoher Wahrscheinlichkeit am einfachsten zu realisieren wäre. Hierfür gibt es mehrere Gründe: Zum einen benötigt diese Realisierung eines Hybridantriebs kein zusätzliches Getriebe. Ein weiterer Grund leitet sich aus der Geometrie der Fähre selbst ab. Die neuen Standorte der Dieselmotoren wären wahrscheinlich im Schiffsrumpf, da diese neben den Elektromotoren nicht an der aktuellen Position bleiben können. Diese beiden Gründe lassen eine serielle Hybridisierung am einfachsten zu. Es ist hervorzuheben, dass durch das günstige Verhältnis der Überfahrtszeit zur Ruhezeit (die Ruhezeit bezieht sich auf die Zeit des Ein- und Ausschiffungsprozesses) zusätzlich die Möglichkeit besteht, während dieser Zeiten die Fähre über Landstrom und damit Grünstrom zusätzlich zu laden.

Hybridantriebe sind in der Automobilbranche weit verbreitet. Ein wichtiger Unterschied zu den auf Schiffen verbauten Antriebskonzepten ist die fehlende Rückgewinnung von Bremsenergie durch den ausbleibenden Kraftschluss zwischen Wasser und Schiffsschraube. Daraus resultiert für Schiffe ein erheblich geringeres Einsparpotential absolut gerechnet. Emissionsreduzierende Effekte

wie der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern können diese Bilanz allerdings noch deutlich verbessern.³⁵

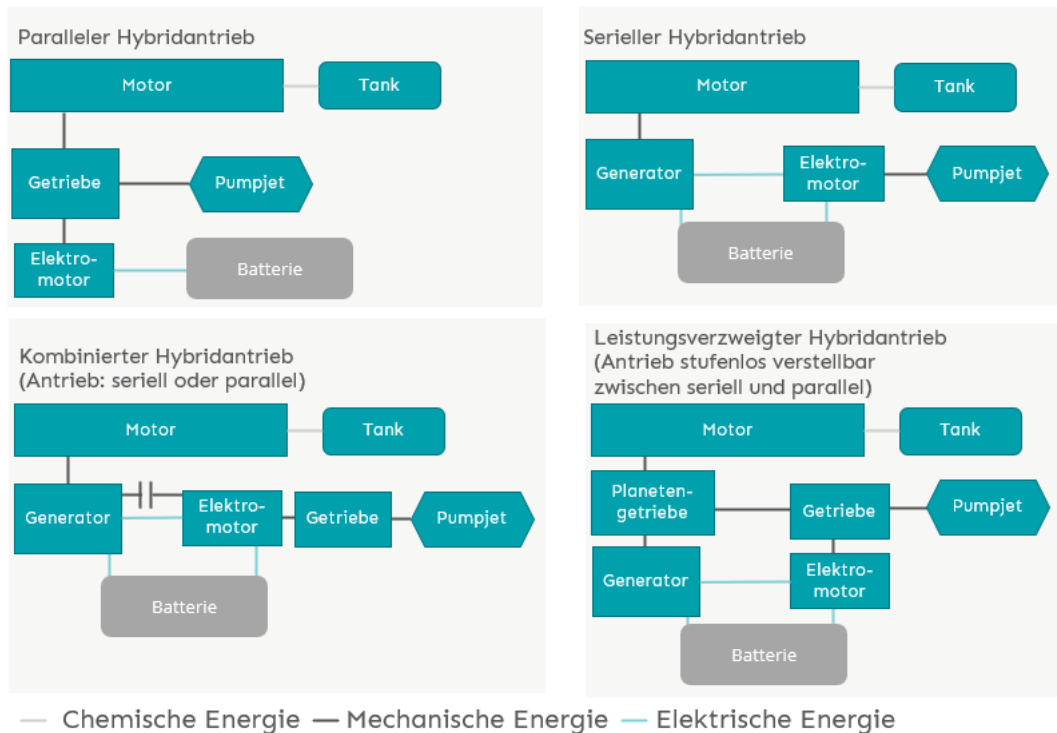


Abbildung 3: Aufbau verschiedener Hybride

3.4.6 Seilbetrieb

Fähren mit Seilbetrieb nutzen die Strömung des Flusses als Antrieb. Es existieren zwei verschiedene Varianten dieses Antriebskonzepts. In der ersten Variante, der Gierseilfähre, hängt die Fähre an einem Stahlseil, das im Fluss verankert ist. Die Kraft des Wassers wird genutzt, indem die Fähre durch Rudereinschlag schräg zur Strömung ausgerichtet wird und so Vortrieb in die angestrebte Richtung erhält. Bei dieser Bauform ist es aufgrund des Stahlseils im Wasser nicht immer für andere Schiffe möglich, den Weg der Fähre zu kreuzen. Alternativ lässt diese Antriebsart bei kleineren Fähren bis ca. 25t Traglast auch eine Befestigung oberhalb des Wassers an einer Laufkatze zu. Bei dieser Bauform ist das Kreuzen anderer Wasserfahrzeuge immer möglich, solange das Führungsseil, an dem die Fähre befestigt ist, hoch genug hängt.

³⁵ Völker, „Hybridantriebskonzepte auf Schiffen“, 133f.

4. Eingrenzung der Konzepte anhand der potenziell umsetzbaren Emissionsreduktion und der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit

4.1 Potenziell umsetzbare Emissionsreduktion

4.1.1 Fossile Treibstoffe

4.1.1.1 LNG als Treibstoff / Dual-Fuel Motor

Bei Verwendung von LNG als Kraftstoff werden Schadstoffemissionen von Schwefeloxid, Stickstoffoxid und Feinstaub im Vergleich zur Verwendung von Schiffsdiesel erheblich gesenkt.³⁶ Die Höhe der eingesparten Treibhausgasemissionen bei Nutzung von LNG statt herkömmlichen Schiffsdiesel ist umstritten. Verschiedene Studien zeigen hier Einsparungen zwischen -1,5% und 20,7% der WTW Treibhausgasemissionen gegenüber Schweröl. Die Well-to-Wake Betrachtung berücksichtigt dabei die gesamten Emissionen von Bereitstellung des Kraftstoffs bis zu seiner Nutzung im Schiff. Die Höhe dieser Emissionsreduktion wird maßgeblich von dem Methanschlupf des verwendeten Motors beeinflusst³⁷. Als Methanschlupf wird hier entweichendes Methan in der Prozesskette bezeichnet. Methan ist ungefähr 25-mal so wirksam wie CO₂ bezüglich des menschengemachten Treibhauseffekts.³⁸ Es ist hervorzuheben, dass es sich nicht nur um die Entweichung durch Leckagen bei Betankung und Transport handelt, sondern auch um einen technisch bedingten Methanschlupf der Verbrennungsmotoren. Zu diesen technisch bedingten Methanemissionen zählen Verluste durch unvollständige Verbrennung im Motor, Ventilverluste beim Spülen der Brennkammer sowie Spaltverluste der Motorkonstruktion.

Die Spanne des angegebenen Methanschlupfs variiert erheblich und wird durch die Bauart des Motors maßgeblich beeinflusst. Ein umgerüsteter Diesel emittiert so erheblich mehr Methan als ein auf Gasbetrieb hin entwickelter und optimierter Motor. Dual-Fuel Motoren grenzen den Methanschlupf stark, aber nicht ganz auf dem Niveau von Gasmotoren ein, da sie immer einen Kompromiss zwischen Diesel und Gas darstellen. Für die Höhe des Methanschlupfs spielt zusätzlich auch die Größe des Motors eine Rolle³⁹. Für den weiteren Verlauf der Studie wird davon

³⁶ Köhler u. a., „Teilstudie “Studie über die Marktreife von Erdgasmotoren in der Binnen-und Seeschifffahrt““, 37ff.

³⁷ Köhler u. a., 45ff.

³⁸ Umweltbundesamt „Die Treibhausgase“

³⁹ Köhler u. a., „Teilstudie “Studie über die Marktreife von Erdgasmotoren in der Binnen-und Seeschifffahrt““, 58ff.

ausgegangen, dass die Well-to-Wake CO₂-Emissionen von LNG in Verbindung mit einem Dual Fuel Diesel Motor 537 kg/MWh betragen.⁴⁰

4.1.1.2 LPG als Treibstoff

Im Prozess der Förderung der Gase bis hin zur Verwendung als Kraftstoff emittiert LPG ca. 17% weniger Treibhausgase als Schiffsdiesel. Auch die Schadstoffemissionen von Schwefeloxid und Stickstoffoxid werden durch die Nutzung von LPG statt Schiffsdiesel stark gesenkt⁴¹. Die CO₂-Emissionen unter Nutzung von LPG als Treibstoff bei gegebener Umrüstung betragen 535 kg/MWh⁴².

4.1.1.3 Graues Methanol als Treibstoff

Diese Form von Methanol erzeugt bei Verwendung als Schiffskraftstoff höhere Treibhausgasemissionen als MGO oder HFO und wird deshalb von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.⁴³ Bezogen auf die in dieser Studie herangezogene WTW-Betrachtung emittiert graues Methanol Kohlenstoffdioxid in Höhe von 788,4 kg/MWh⁴⁴.

4.1.1.4 Grauer, brauner und schwarzer Wasserstoff als Treibstoff

Lokal entstehen bei der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff in einer Brennstoffzelle oder einem Verbrennungsmotor keine CO₂-Emissionen. Allerdings werden im Herstellungsprozess Treibhausgase freigesetzt. Bei flüssigem Wasserstoff sind daher die Well-to-Wake Treibhausgasemissionen von grauem Wasserstoff 66% höher als die von MGO. Allgemein benötigt Wasserstoff zur Komprimierung weniger Energie als zur Verflüssigung. Der durch den geringeren Energieaufwand bestehende Vorteil des Hochdruckwasserstoffs wird somit durch die höhere Investition in das Speichersystem ausgeglichen. Grauer Wasserstoff liefert mit einem CO₂-Ausstoß von 1086 kg/MWh keine Emissionsreduktion gegenüber dem aktuell verwendeten MGO und wird deshalb als zukünftiger Kraftstoff nicht weiter betrachtet.⁴⁵

⁴⁰ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

⁴¹ Brinks, „LPG as a Marine Fuel“, 25.

⁴² Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

⁴³ Liu u. a., „Is Methanol a Future Marine Fuel for Shipping?“, 2.

⁴⁴ Gielen u. a., „Innovation Outlook: Renewable Methanol“, 62.

⁴⁵ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

4.1.1.5 Blauer Wasserstoff als Treibstoff

Blauer Wasserstoff emittiert verglichen mit herkömmlichen HFO zwischen 83% und 86% weniger Treibhausgase bei Verwendung.⁴⁶ Wasserstoff, der auf diese Weise hergestellt wurde, ist nicht komplett emissionsfrei, da bei CSS-Technologien nicht die gesamten Treibhausgase gebunden werden können. Zusätzlich ist anzumerken, dass blauer Wasserstoff trotz seiner geringen Emissionen trotzdem auf fossiler Basis hergestellt wird und somit keine dauerhafte nachhaltige Lösung darstellt.⁴⁷ In der Well-to-Wake Betrachtung emittiert blauer Wasserstoff CO₂ in Höhe von 25,13 kg/MWh⁴⁸.

4.1.1.6 Blaues Ammoniak als Treibstoff

Bei Verwendung von blauem Ammoniak werden zwischen 66% und 73% weniger Treibhausgasemissionen ausgestoßen als im äquivalenten Betrieb mit HFO.⁴⁹ Da blaues Ammoniak auf Basis von blauem Wasserstoff hergestellt wird, gelten sowohl für die Emissionsreduktion als auch in Bezug auf die Nachhaltigkeit die im Kapitel 4.1.2 dargestellten Argumente. Die CO₂-Emissionen von blauem Ammoniak unter Einbezug seiner Herstellung betragen 187,5 kg/MWh⁵⁰.

⁴⁶ Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“, 15.

⁴⁷ van Cappellen, Croezen, und Rooijers, „Feasibility study into blue hydrogen Technical, economic & sustainability analysis“, 38.

⁴⁸ van Cappellen, Croezen, und Rooijers, 38.

⁴⁹ Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“, 15.

⁵⁰ Ausfelder, Perspective Europe 2030, 29.

4.1.2 Synthetische Treibstoffe

4.1.2.1 Grünes synthetisches LNG als Treibstoff

Synthetische Treibstoffe wie grünes synthetisches LNG können Treibhausgasemissionen stark reduzieren, wenn der zur Produktion benötigte Strom vollständig aus erneuerbaren Energien gespeist wird. Des Weiteren emittiert grünes synthetisches LNG während des Betriebs wie fossiles LNG unverbranntes Methan, den so genannten Methanschlupf. Dieser erweist sich als problematisch, da Methan ungefähr 25-mal so wirksam ist wie CO₂ bezüglich des menschengemachten Treibhauseffekts (siehe 4.1.1.1 LNG als Treibstoff).⁵¹ Je nach Bauart des Motors ist die Höhe seiner Ausprägung unterschiedlich, so sind die WTW Treibhausgasemissionen bei einem Dual-Fuel Dieselmotor 98% geringer als bei MGO. Die Höhe dieser Emissionsreduktionen stützt sich auf die Annahme der vollständigen Verwendung von erneuerbaren Energien zur Produktion des E-Treibstoffs.⁵² In der weiteren Betrachtung wird von einem Dual-Fuel Dieselmotor für den Fall, dass LNG betrachtet wird, ausgegangen. So werden 12 kg/MWh CO₂ bei Verwendung von grünem synthetischen LNG emittiert.⁵³

4.1.2.2 Grüner synthetischer Wasserstoff als Treibstoff

Grüner synthetischer Wasserstoff lässt sich in die Klasse der E-Fuels einordnen. Er kann, in Brennstoffzellen genutzt, Emissionsreduktionen von 100% im Rahmen des Well-to-Wake Ansatz bewirken, da er vollständig durch Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen wird.⁵⁴

4.1.2.3 Grünes synthetisches Ammoniak als Treibstoff

Die Höhe der Treibhausgasemissionsreduktion bei der Verwendung von grünem synthetischem Ammoniak als Treibstoff beträgt 100%, da per Definition, der hierfür benötigte Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energien bezogen wird. Aufgrund mangelnder Daten über die Verwendung von Ammoniak in Hubkolbenmotoren kann die exakte Höhe der Stickoxidemissionen nicht bestimmt werden. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass eine Nachbehandlung der Abgase erforderlich sein wird.⁵⁵

⁵¹ Umweltbundesamt „Die Treibhausgase“

⁵² Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 6.

⁵³ Lindstad u. a., 13.

⁵⁴ Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“, 13.

⁵⁵ Law u. a., 13.

4.1.3 Biologische Treibstoffe

4.1.3.1 Bio-LNG als Treibstoff

Bio-LNG ist bezüglich der Emissionsreduktion während der Herstellung sowie des Methanschlupfs annähernd äquivalent zu grünem synthetischen LNG (siehe 4.1.2.1 Grünes Synthetisches LNG als Treibstoff) zu betrachten. Grund hierfür ist der geschlossene Kohlenstoffkreislauf der Biomasse und die starke Ähnlichkeit bezüglich der Zusammensetzung der Endprodukte. Verwendet man ein noch weiteres Betrachtungsfenster, so kann man Bio-Kraftstoffe anhand der für ihre Produktion nötigen Rohstoffe unterscheiden. Bio-Kraftstoffe können aus tierischen Fetten oder Abfällen, forst- und landwirtschaftlichen Abfällen, Nahrungspflanzen und Pflanzenölen hergestellt werden. So kann in diesem weiteren Rahmen mit eingepreist werden, ob die Rohstoffe agrarwirtschaftlich produziert wurden oder es sich um Reststoffe handelt, an welchem Standort die jeweilige Biomasse angebaut wird, ob potenziell Abholzung zur Landnutzung für die Produktion der Biomasse stattfindet sowie wie effizient die Produktionsprozesse der Anlagen sind.⁵⁶ Im weiteren Verlauf der Studie werden Bio-Kraftstoffe als CO₂-neutral betrachtet aufgrund ihres geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs⁵⁷ unter der Annahme, dass bei ihrer Produktion ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien genutzt wird und die teilweise benötigten Zusätze ebenfalls CO₂-neutral hergestellt wurden. Ausnahmen hiervon bilden Erscheinungen wie der Methanschlupf.

4.1.3.2 Bio-LPG als Treibstoff

Bio-LPG ist ein Nischenkraftstoff in der Testphase im maritimen Bereich. Es wurde zur Treibhausgasemissionsreduktion bei der Nutzung von Bio-LPG als Treibstoff keine ausreichend konkrete Datenquelle gefunden. Es ist anzunehmen, dass die Emissionsreduktion von Bio-LPG sehr ähnlich der der anderen Bio-Treibstoffe ausfällt. Deswegen wird Bio-LPG als treibhausgasneutral betrachtet.

4.1.3.3 Bio-Methanol als Treibstoff

Das aus Biomasse hergestellte Bio-Methanol bietet aufgrund seines geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs großes Potential, die Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt stark zu reduzieren. Für die emissionsfreie Produktion von Bio-Methanol ist darauf zu achten, dass der hier benötigte Wasserstoff CO₂-frei produziert wurde und der für die Herstellung des Methanols

⁵⁶ Plevrakis u. a., „Setting the course to low carbon shipping - view of the value chain“, 51f.

⁵⁷ Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“, 12.

benötigte Strom ebenfalls CO₂-neutral ist. Diese Studie geht hiervon bei der weiteren Betrachtung aus. Die Argumentation über den geschlossenen CO₂-Kreislauf sowie den in dieser Studie betrachteten Rahmen erfolgt analog zu Kapitel 4.1.4.2.

4.1.3.4 Bio-Diesel als Treibstoff

Bio-Diesel wird, da er in vorgelagerten Prozessen CO₂ in Form von Pflanzen bindet und nur dieses CO₂ bei Nutzung wieder freigesetzt wird, als treibhausgasneutral betrachtet.⁵⁸

⁵⁸ Law u. a., 12.

4.1.4 Sonderkonzepte

4.1.4.1 Entschwefelung (Scrubber)

Bei Verwendung eines Scrubbers unter weiterer Nutzung von HFO werden im Verhältnis zur Nutzung ohne Scrubber die Schwefeldioxid-Emissionen um 98% gesenkt, die für die Betrachtung relevanten Treibhausgasemissionen stiegen allerdings. Es wird davon ausgegangen, dass der Effekt bei MGO ähnlich hoch ausfällt. So erhöht sich beispielsweise der Ausstoß von CO₂ um 2%. Aufgrund dieser Erhöhung wird die Möglichkeit der Nutzung eines Scrubbers zur Emissionsreduktion für den weiteren Verlauf der Machbarkeitsstudie ausgeschlossen.⁵⁹

4.1.4.2 Motorenwechsel

Die exakte Höhe der Emissionsreduktion bei einem Motorwechsel lässt sich in dieser Phase der Machbarkeitsstudie nur schwer beziffern. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Motortechnologie in den vergangenen sechs Jahren keine Veränderung durchlaufen hat, die eine mit anderen alternativen Kraftstoffen vergleichbare Emissionsreduktion erzeugt. Auf Basis dieser Annahme wäre eine Neuinvestition, auf welche nur eine kleine Verbesserung folgt, nicht ratsam.

4.1.4.3 Generatordimensionierung

Diese Methode wird im Nachfolgenden nicht mehr betrachtet, denn ob und inwieweit die Generatordimensionierung in diesem Fall einen signifikanten Einfluss auf die Emissionen hat, ist nicht bekannt. Des Weiteren ist fraglich, ob ein Austausch der Motoren ein vertretbares Kosten-Nutzen Verhältnis aufweist bei vergleichbar niedriger Emissionseinsparung.

4.1.4.4 Batteriebetrieb

Über den Batteriebetrieb ist ein emissionsfreier Fährbetrieb möglich, wenn der genutzte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Da bei den anderen betrachteten Antriebskonzepten jeweils nur der Treibstoff und seine Emissionslast betrachtet wurde und nicht das gesamte Antriebssystem, werden die durch die Produktion der Batterien entstehenden Emissionen im Vergleich der Technologien bewusst nicht mitbetrachtet.

⁵⁹ Comer, „Air Emissions and Water Pollution Discharges from Ships with Scrubbers“, 16.

4.1.5 Orts- oder fahrzeugspezifische Sonderkonzepte

4.1.5.1 Hybrides Konzept

Der Grad der Emissionsreduktion von hybriden Konzepten lässt sich approximativ aus dem Verhältnis der Nutzung von fossilen und treibhausgasarmen bzw. treibhausgasfreien Treibstoffen bzw. Antrieben ableiten. Es wird dazu angenommen, dass der Strom zu 100% aus erneuerbaren Energien stammt, und somit als emissionsfrei zu bewerten ist. In diesem approximativen Ansatz wird ein Hybridisierungsgrad von 60% angenommen. Dies bedeutet, dass 60% der Antriebsenergie aus Grünstrom bereitgestellt wird.

Durch Unklarheiten bezüglich der effektiven Ladezeiten, die während des operativen Betriebs möglich sind, lässt sich der exakte Emissionsminderungsgrad für hybride Konzepte nur schwer bestimmen. Auch die Dimensionierung der Batterie an Bord spielt dabei eine entscheidende Rolle. Es wird daher die Annahme getroffen, dass die Fähre mit Batteriespeichern ausgestattet wird, welche bei voller Ladung 2 bis 3 Stunden durchschnittliche Nutzung ermöglichen. Während des Ein- und Ausschiffungsprozesses können die Batterien geladen werden. Nur beim Auftreten lange anhaltender Stoßzeiten müsste die Batterie dieselektisch aufgeladen werden. Durch den hohen Grad an Modularität des Hybridkonzepts ist auch die Speisung der Batterie über Photovoltaikanlage möglich. Aufgrund der hohen Volatilität der Stromerzeugung dieser Anlage sowie Unsicherheiten bezüglich der baulichen Konstruktion wird diese Art der Batterieladung nicht miteinbezogen. Ob bei dieselektischem Betrieb alle 4 Motoren im Generatorbetrieb benötigt werden, ist fraglich und muss geprüft werden. Grund hierfür ist der stark unterschiedliche Wirkungsgrad der Dieselmotoren in Abhängigkeit von deren Betriebspunkt. Laufen diese in ihrem Bestpunkt, so haben die Motoren einen deutlich höheren Wirkungsgrad als im jetzigen Betrieb. Zusätzlich sind Leistungsspitzen für Extremfälle, die diese Motoren in der aktuellen Betriebsform abdecken müssen, durch die Trennung von Stromerzeugung und Antrieb so wahrscheinlich nicht mehr erforderlich. Diese müssen nun von den Elektromotoren abgedeckt werden. Abschließend lässt sich sagen, dass prinzipiell bei der hier gewählten Antriebsform ein Betrieb ausschließlich mit MGO möglich wäre (Hybridisierungsgrad 0%), dieser allerdings keine Form der Emissionsreduktion mit sich bringen würde. Trotzdem bietet der diskutierte Ansatz bei adäquater Nutzung die Möglichkeit, einen Großteil der Zeit mit Strom aus erneuerbaren Energien zu fahren und lediglich Engpässe über MGO zu überbrücken.

4.1.5.2 Seilbetrieb

Der Seilbetrieb nutzt die Strömung des Flusses und kommt so ohne konventionelle Motoren o.Ä. aus. Durch die natürliche Beschaffenheit des Antriebs eines Seilbetriebs gilt dieser als emissionsfrei.

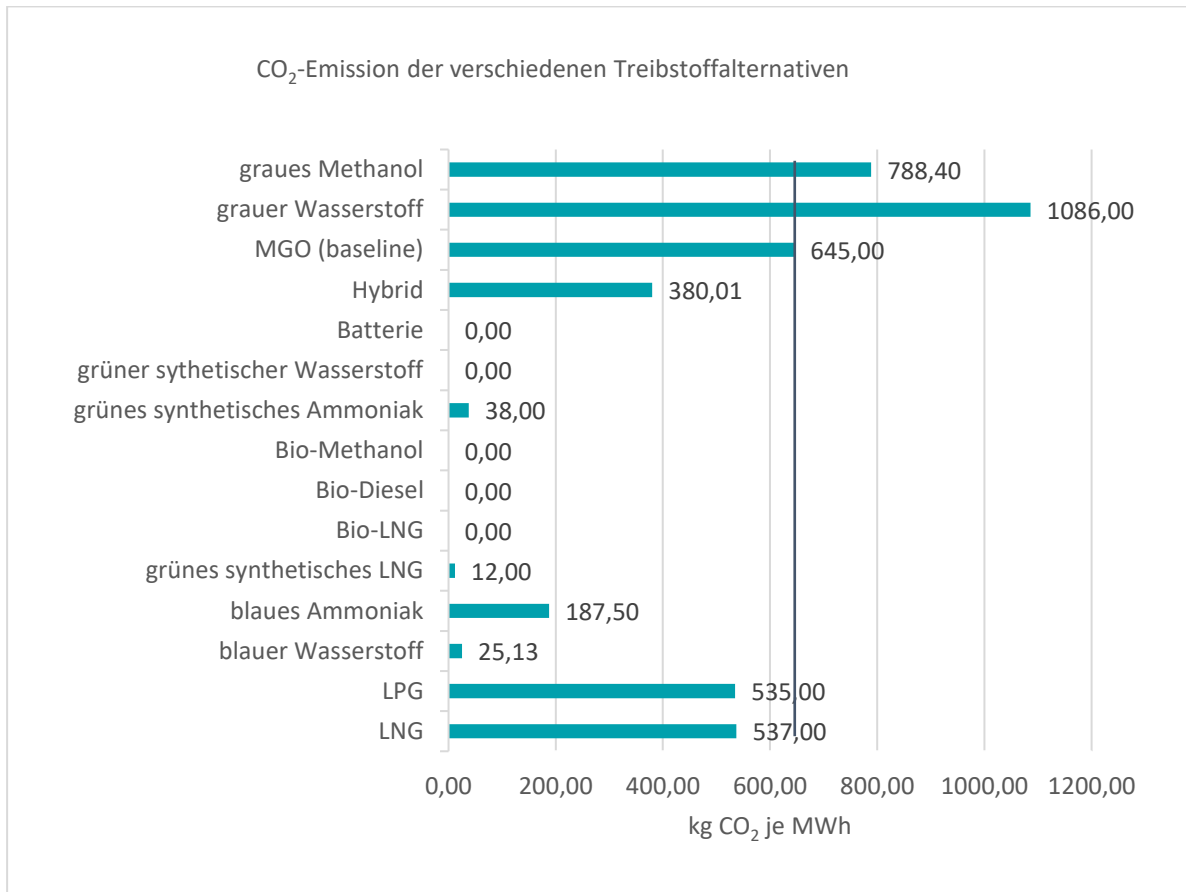


Abbildung 4: CO₂-Emission der verschiedenen Treibstoffalternativen

Tabelle 1: Kohlenstoffdioxidemission der verschiedenen Treibstoffe

Treibstoff	CO ₂ kg/MWh
MGO (Baseline)	645 ⁶⁰
LNG	537 ⁶¹
LPG	535 ⁶²
Graues Methanol	788,4 ⁶³
Grauer Wasserstoff	1086 ⁶⁴
Blauer Wasserstoff	25,13 ⁶⁵
Blaues Ammoniak	187,5 ⁶⁶
Grünes synthetisches LNG	12 ⁶⁷
Bio-LNG	0
Bio-Diesel	0 ⁶⁸
Bio-LPG	0
Bio-Methanol	0
Grünes synthetisches Ammoniak	38 ⁶⁹
Grüner synthetischer Wasserstoff	0 ⁷⁰
Motorenwechсел	-
Batterie (Grünstrom)	0
Hybrid (60% Grünstrom 40% MGO)	380,01
Seil	-
Generatordimensionierung	-

4.2 Nachrüstung, Umbau und Neuanschaffung

Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten der Nachrüstung und des Umbaus oder der Notwendigkeit einer Neubeschaffung bei Wechsel auf die jeweilige alternative Antriebstechnologie. Als Bewertungs-

⁶⁰ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

⁶¹ Lindstad u. a., 13.

⁶² Lindstad u. a., 13.

⁶³ Gielen u. a., „Innovation Outlook: Renewable Methanol“, 62.

⁶⁴ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

⁶⁵ van Cappellen, Croezen, und Rooijers, „Feasibility study into blue hydrogen Technical, economic & sustainability analysis“, 38.

⁶⁶ Ausfelder, Perspective Europe 2030, 29.

⁶⁷ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

⁶⁸ Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“, 12.

⁶⁹ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 13.

⁷⁰ Lindstad u. a., 13.

kriterium wird hier das Maß der Weiternutzung der bestehenden Anlagentechnik verwendet. Auf Basis dieser Einschätzung werden die verschiedenen alternativen Antriebstechnologien in drei Klassen eingeteilt. Die erste Klasse beinhaltet Treibstoffe, deren Verwendung im Dual Fuel Betrieb zusammen mit MGO möglich wäre. Zusätzlich können die Tankinfrastruktur sowie das Kraftstoffzufuhrsystem von den Tanks zum Motor mit hoher Wahrscheinlichkeit weitergenutzt werden, auch bei voller Umstellung auf den alternativen Treibstoff. Für diese Treibstoffe müssen die Motoren auf den Dual Fuel Betrieb umgerüstet werden. Ob für Treibstoffe dieser Klasse ein weiterer separater Tank zusätzlich eingebaut werden muss, ist zu diskutieren. Die zweite Klasse umfasst alle Treibstoffe, die grundsätzlich im Dual-Fuel Betrieb genutzt werden können, die aber im Solobetrieb andere Tanks oder Zuleitungen zu den Motoren benötigen. Der Solobetrieb zeichnet sich durch die ausschließliche Nutzung von einem der beiden möglichen Treibstoffe aus. Sollte die Entscheidung auf eine der Treibstoffalternativen dieser Klasse fallen, wird es notwendig sein, die Motoren umzurüsten und neue Tanks sowie ein neues Kraftstoffzufuhrsystem von diesen Tanks hin zum umgerüsteten Motor einzubauen. Bei Treibstoffen der dritten Klasse ist weder die Verwendung der vorhandenen Motoren noch die Weiterverwendung der Tanks möglich. Es ist nicht auszuschließen, dass Teilkomponenten weiterverwendet werden können; ein Großteil der Anlagentechnik wird allerdings ersetzt werden müssen. Bei diesen Treibstoffen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Umbauaufwand so hoch, dass nachzuprüfen ist, ob eine Neuanschaffung nicht wirtschaftlich sinnvoller wäre. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2: Auswirkungen der Treibstoffalternativen auf die vorhandene Infrastruktur

Alternative Treibstoffe	Klasse	Motor	Tanksystem	Sonstige Anmerkungen
Bio-Diesel	1	Kleine Umrüstungen eventuell notwendig, aber Langlebigkeitsverluste	Kann mit operativen Einschränkungen weitergenutzt werden	
Hybrid	2	Keine Umrüstung, allerdings teilweise Neubeschaffung notwendig	Neubeschaffung des Batteriesystems sowie der Ladeinfrastruktur notwendig	Hybrid fährt zu mindestens 60% mit Grünstrom
Bio-Methanol	2	Umrüstung notwendig	Kleine Umrüstungen notwendig	Niedriger Flammpunkt
LNG-Arten	2	Umrüstung notwendig	Neubeschaffung notwendig	
LPG-Arten	2	Umrüstung notwendig und fehlendes Know-How	Neubeschaffung notwendig und fehlendes Know-How	
Ammoniak-Arten	2	Umrüstung notwendig	Neubeschaffung notwendig	Giftig
Wasserstoff-Arten	3	Neubeschaffung notwendig	Neubeschaffung notwendig	
Batterie	3	Neubeschaffung notwendig	Neubeschaffung notwendig	

4.2.1 Nachrüstung (Klasse 1)

Treibstoffe, die im aktuell genutzten Motor im Dual-Fuel Betrieb genutzt werden können oder Antriebskonzepte, die durch die Grundarchitektur der Fähre durch äquivalenten Umgang bezüglich Betankung, benötigter Tankgröße, Gefahrenstoffklasse etc. ohne größere Umbaumaßnahmen umgesetzt werden können, bilden die erste betrachtete Klassifizierung dieses Kapitels. Von den betrachteten Treibstoffalternativen erfüllt nur Bio-Diesel die hier geforderten Kriterien. Bio-Diesel lässt sich kurzfristig annähernd äquivalent zu MGO bunkern, ist in Beimischung mit MGO in umgerüsteten Motoren laut Hersteller verwendbar und kann grundsätzlich durch dieselben Leitungen wie MGO transportiert werden. Nach Expertengesprächen mit einem Dienstleister, der eine solche Umrüstung durchführen könnte und auch die Wartung von auf Bio-Diesel umgerüsteten Motoren übernimmt, muss diese Alternative aufgrund von wesentlichen operativen Mängeln verworfen werden. Grund hierfür ist unter anderem eine

stark zurückgehende Langlebigkeit der Maschinen, da sich Bio-Diesel laut dem Experten deutlich aggressiver gegenüber den Bauteilen verhält. Zusätzlich neigt Biodiesel bei langfristiger Bunkerung zur Pilzbildung. Sobald dies geschieht, ist der Treibstoff nicht mehr verwendbar und muss abgepumpt werden. Hierbei ist eine geringere Verfügbarkeit der Fähre zu erwarten, weshalb diese Variante nicht weiter betrachtet wird.

4.2.2 Umbau (Klasse 2)

Die zweite Klasse beinhaltet das hybride Antriebskonzept, die bei Raumtemperatur gasförmigen Kraftstoffe und Bio-Methanol, da diese beim Bunkern anders gehandhabt werden müssen als flüssige Treibstoffe wie beispielsweise das aktuell verwendete MGO.

Bei einem Umbau auf den hybriden Betrieb können große Teile der bisher verwendeten Komponenten mit hoher Wahrscheinlichkeit weiterverwendet werden. Hierzu zählen insbesondere die Dieselmotoren und die Tanks. Jedoch muss die räumliche Anordnung dieser verändert werden. Konkret bedeutet dies, dass bei einem Umbau an den Plätzen der jetzigen Dieselmotoren stattdessen Elektromotoren die Pumpjets über eine Welle mit dem benötigten Drehmoment versorgen. Diese neu zu beschaffenden Elektromotoren müssen über ein geeignetes Kabelsystem mit dem ebenfalls neu zu beschaffenden Batteriespeicher verbunden sein. Die bisherigen Dieselmotoren sollen im generatorischen Betrieb den Batteriespeicher bei Bedarf speisen. Zusätzlich zu dieser Einspeisungsmöglichkeit soll es die Option geben, die Batteriespeicher mit Landstrom zu laden. Für diese Option ist der Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur notwendig. Die Umbaumaßnahmen hierfür werden als wahrscheinlich moderat zeitaufwändig und komplex eingeschätzt.

Trotz der unterschiedlichen Aggregatzustände bei Raumtemperatur für der restlichen alternativen Treibstoffe dieser Klasse existieren Konzepte zur Dual-Fuel Nutzung dieser in Kombination mit MGO. Hierzu zählen LNG, LPG, Bio-LNG, blaues Ammoniak, grünes synthetisches LNG, Bio-LPG, grünes synthetisches Ammoniak und Bio-Methanol. Bio-Methanol besitzt in dieser Klasse eine Sonderstellung, da es trotz seines flüssigen Aggregatzustands bei Raumtemperatur und Normaldruck durch seinen niedrigen Flammpunkt anders an Bord gehandhabt werden muss als beispielsweise Bio-Diesel oder MGO. Die benötigten Tanksysteme müssen weder gekühlt werden noch enorme Drücke aushalten. Es wäre sogar eine Lagerung in einem Doppelhüllenboden des Schiffs möglich. Durch seinen niedrigen Flammpunkt von 12 °C gelten jedoch ähnliche Sicherheitsvorkehrungen an Bord wie beim Betrieb mit LNG. Außerdem besitzt Bio-Methanol eine geringere Energiedichte als MGO. Dies hat zur Folge, dass bei Weiterverwendung des aktuell genutzten Motors Einspritzdüsen mit höherem Kraftstoffdurchsatz verwendet

werden müssen, um weiterhin die gleiche Motorleistung garantieren zu können wie vor dem Umbau. Ebenso müsste der neu verbaute Tank bei gleichen Betankungsintervallen deutlich größer ausfallen⁷¹.

Bezüglich der benötigten Umbaumaßnahmen bei einer eventuellen Umrüstung sind LNG, Bio-LNG und grünes synthetisches LNG gleich zu behandeln, da es sich bei den drei LNG-Arten um annähernd die gleichen chemischen Stoffe handelt. Die Neuanschaffung eines neuen Treibstoffspeicher- und Treibstofftransportsystems ist durch den von MGO verschiedenen gasförmigen Aggregatzustand bei geringerem Druck unumgänglich. Ob der aktuell verbaute Motor auf einen Dual-Fuel Betrieb umrüstbar ist, ist zu prüfen. Allerdings existieren Beispiele, in welchen diese Umrüstung zur Dual-Fuel Nutzung bereits erfolgreich vorgenommen wurde⁷². Auch bei dieser Treibstoffvariante fallen die benötigten Tanks größer aus als die bisherigen. Zusätzlich ist auf die Positionierung der Auslässe der Druckbegrenzungsventile zu achten⁷³. Die Verwendung von LPG und Bio-LPG als Treibstoff gilt als Nischenanwendung. Manche LPG-Transportschiffe nutzen Teile ihrer Fracht im Dual-Fuel Betrieb als Treibstoff. Durch die geringe Häufigkeit der Nutzung von LPG als Schiffstreibstoff existieren wenige bis keine marktfähigen Umrüstungen hin zu einem Dual-Fuel Betrieb. Aufgrund von mangelnden Pilotprojekten werden LPG und Bio-LPG deshalb vom weiteren Verlauf der Studie als potenzielle Treibstoffalternativen ausgeschlossen. Grünes synthetisches Ammoniak und blaues Ammoniak werden ebenfalls zusammengefasst betrachtet, ähnlich wie die LNG-Arten. Ammoniak wird in der Schifffahrtsbranche in der Regel bei Überdruck von ca. 10 Bar flüssig gebunkert; damit wäre die Weiternutzung der bestehenden Tanks auch hier ausgeschlossen.

4.2.3 Neuanschaffung (Klasse 3)

Die dritte Treibstoffklasse besteht aus den Wasserstoffarten (grüner synthetischer Wasserstoff, blauer synthetischer Wasserstoff) und dem elektrischen Betrieb mithilfe einer Batterie. Die benötigten Umbaumaßnahmen für die beiden Systeme sind hoch, es können keine oder nur sehr kleine Teile der bereits verbauten Anlagentechnik weiterverwendet werden, Motor und Tanksystem müssen neu beschafft werden. Auch die aktuelle Dimensionierung der nutzbaren Freiräume der Fähren sowie der Zugang zu den relevanten Komponenten sind bei diesen beiden Treibstoffen nicht auf deren Funktionalität ausgelegt. Diese Aussage bezieht sich sowohl auf das benötigte Volumen für die Tanks oder Batterien als auch auf deren Gewicht, die Schnittstellen zur Betankung, die Versorgung der

⁷¹ Shukla u. a., Alcohol as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines, 65f.

⁷² wie beispielsweise bei der Fähre TR Muflon Tug

⁷³ Jurkovic u. a., „Proposal of Conversion the Tugboat Engines to Diesel – LNG Operation“.

Antriebselemente mit dem Energieträger und die räumliche Lage der Energiespeicher auf der Fähre. Hieraus folgt, dass eine Umrüstung der Fähre auf Wasserstoff oder Batteriebetrieb den Betreiber vor große konstruktions-technische Herausforderungen stellt, die wahrscheinlich nicht wirtschaftlich sinnvoll in Form eines Umbaus gelöst werden können. Deshalb wird, sollte sich der Betreiber für eine der Varianten der dritten Klasse entscheiden, eine Neuanschaffung einer auf diese Konzepte ausgelegten Fähre mit hoher Wahrscheinlichkeit unausweichlich sein.

4.3 Vor- und nachgelagerte Infrastruktur

Im folgenden Kapitel wird auf Besonderheiten der benötigten vor- und nachgelagerten Infrastruktur eingegangen. Hierbei werden sowohl die Betankung und das benötigte Tankvolumen, die Wartungsintensivität aber auch Spezifika wie Speicherverluste der mit den verschiedenen Treibstoffen einhergehenden Motortechnologien betrachtet. Ziel und Zweck ist es, durch Approximationen bezüglich des Gewichts und des Volumens die für den Fährbetrieb nicht praktikabel erscheinenden Treibstoff- und Antriebssysteme zu identifizieren.

Als Grundlagenvergleichsmodell wird hier der aktuelle Betrieb mit MGO herangezogen. Zur Betankung fahren Tanklaster auf das Schiff und versorgen so die Fähren mit dem benötigten Treibstoff. So muss die Personen- und Autofähre Linz-Kripp bei ihrem Verbrauch von ca. 900 l täglich alle 14 bis 16 Tage mit 12.600 l MGO betankt werden. Die Fähre Sankt Johannes mit einem Verbrauch von ca. 600 l am Tag wird bei der aktuellen Nutzung ca. alle drei Wochen mit 12.000 l MGO betankt. MGO hat eine Dichte von 0,860 kg/l, damit entsprechen die getankten 12.000 l einer Masse von 10,836 t mit einem Heizwert von 11,89 kWh/kg. In den nachfolgenden Tabellen 3 und 4 sind das benötigte Tankvolumen und der zu betankende Massenstrom bei verschiedenen Betankungstaktungen für die beiden Fähren berechnet.

Die folgenden Beschreibungen und Analysen bezüglich des benötigten Tankvolumens und Gewichts beziehen sich auf die Personen- und Autofähre Linz-Kripp. Die Betrachtung erfolgt analog für die Fähre Sankt Johannes, da sich auch bei unterschiedlichen Schiffen gleiche Verhältnisse zwischen Masse, Volumen und von den Treibstoffen bereitgestellte und nutzbare Energie ergeben.

Bei genauer Betrachtung der Tabellen 3 und 4 fällt schnell auf, dass sich die benötigten Tankvolumina stark unterscheiden. Das für den aktuellen Betrieb genutzte MGO hat die höchste volumetrische Energiedichte und damit das kleinste Volumen von 12.600 l. Würde bei gleicher Nutzung unter der Annahme identischer Wirkungsgrade flüssiger tiefkalter Wasserstoff getankt werden, so ist dessen Volumen mit ca. 35.700 l fast dreimal so groß. Generell lassen sich die Treibstoffe volumetrisch in drei Klassen einteilen: Treibstoffe mit sehr hoher

volumetrischer Energiedichte wie LNG, LPG, grünes synthetisches LNG oder Bio-LNG (zwischen 12.600 l und 20.000 l benötigtes Tankvolumen), Treibstoffe mit passabler volumetrischer Energiedichte wie blaues Ammoniak, grünes synthetisches Ammoniak oder Bio-Methanol (zwischen 27.000 l und 29.000 l benötigtes Tankvolumen) und Treibstoffe mit verhältnismäßig geringer volumetrischer Energiedichte wie blauer und grüner synthetischer Wasserstoff (> 35.000 l benötigtes Tankvolumen). Batteriespeicher genießen hier eine Sonderstellung. Hier wird, selbst wenn die Fähre nur mit einer Batterie, die den Energiebedarf für einen Tag deckt, ein Volumen von ca. 28.500 l notwendig.

Falls davon auszugehen ist, dass die Freiräume auf dem Deck und unter Deck der Fähre für die Tanks jeder der betrachteten Treibstoffalternativen ausreichen, so ist das benötigte Tankvolumen nicht relevant für den Fährbetrieb, anders als die beförderte Masse, die permanent transportiert werden muss. Durch eine geringere Masse könnten sich kleine Wirkungsgraderhöhungen realisieren lassen. Bezüglich der Masse, die betankt werden muss, um die aktuellen Betankungszyklen einzuhalten, lassen sich die Treibstoffe ebenfalls in 3 Klassen einteilen. Auch hier liefert MGO mit einer Masse von 10,83 t die Vergleichsgrundlage. Die erste Klasse bilden blauer und grüner synthetischer Wasserstoff mit einer Masse von 2,53 t bezogen auf die aktuell praktizierten Betankungszyklen. Das Gewicht der Treibstoffe in der zweiten Klasse ist vergleichbar mit dem von MGO. Diese Klasse wird durch LNG, Bio-LNG, grünes synthetisches LNG, LPG und dem aktuell verwendeten MGO gebildet. Die Spanne der benötigten Masse der Treibstoffe erstreckt sich zwischen 8,80 t und 10,83 t. Die dritte Treibstoffklasse, sortiert bezüglich ihrer gravimetrischen Energiedichte, bilden Bio-Methanol, blaues Ammoniak und grünes synthetisches Ammoniak mit zu tankenden Massen zwischen 20,80 t und 22,26 t. Auch bei der Gewichts-betrachtung spielt die Batterie eine Sonderrolle. Bei Auslegung auf einen Tag hätte diese ein Gewicht von 30,56 t und wäre damit fast dreimal so schwer wie die anderen Treibstoffe. Ein hybrides Konzept bildet hier bei annehmbarem Batteriegewicht und einem etwas kleineren MGO-Tank eine Zwischenlösung. Das Batteriesystem muss durch die zusätzliche Lademöglichkeit der Batterien über Landstrom und den generatorischen Betrieb der Dieselmotoren nicht mehr auf einen kompletten Betriebstag ausgelegt werden, sondern eher eine Versorgung der Motoren von wenigen Stunden gewährleisten. Es kann im Vergleich zur rein elektrischen Alternative deutlich herunterskaliert werden. Geht man von einer Überbrückungszeit von 3 Stunden aus und einem durchschnittlichen Energiemix in der Nutzung von 60% Grünstrom und 40% MGO, so haben die Energiespeichermedien des beschriebenen Systems eine Masse von 9,43 t und ein Volumen von 9.800 l unter der Annahme der zweiwöchentlichen Betankung mit MGO.

Für alle alternativen Treibstoffarten, ausgenommen der Batterien, würde die potenzielle Betankung grundsätzlich analog erfolgen: Ein LKW, der den Treibstoff geladen hat, fährt an Bord und betankt die Fähre. Die Verfügbarkeit der Treibstoffe wird zur Begrenzung dieser Studie einzig und allein für die finalen drei Treibstoffalternativen untersucht. Bei der Ladung der Batterien ist eine einfache, schnelle und sichere Ladelösung zu finden, die auch das Laden während kurzer Pausen oder des Ein- und Ausschiffungsprozesses ermöglicht.

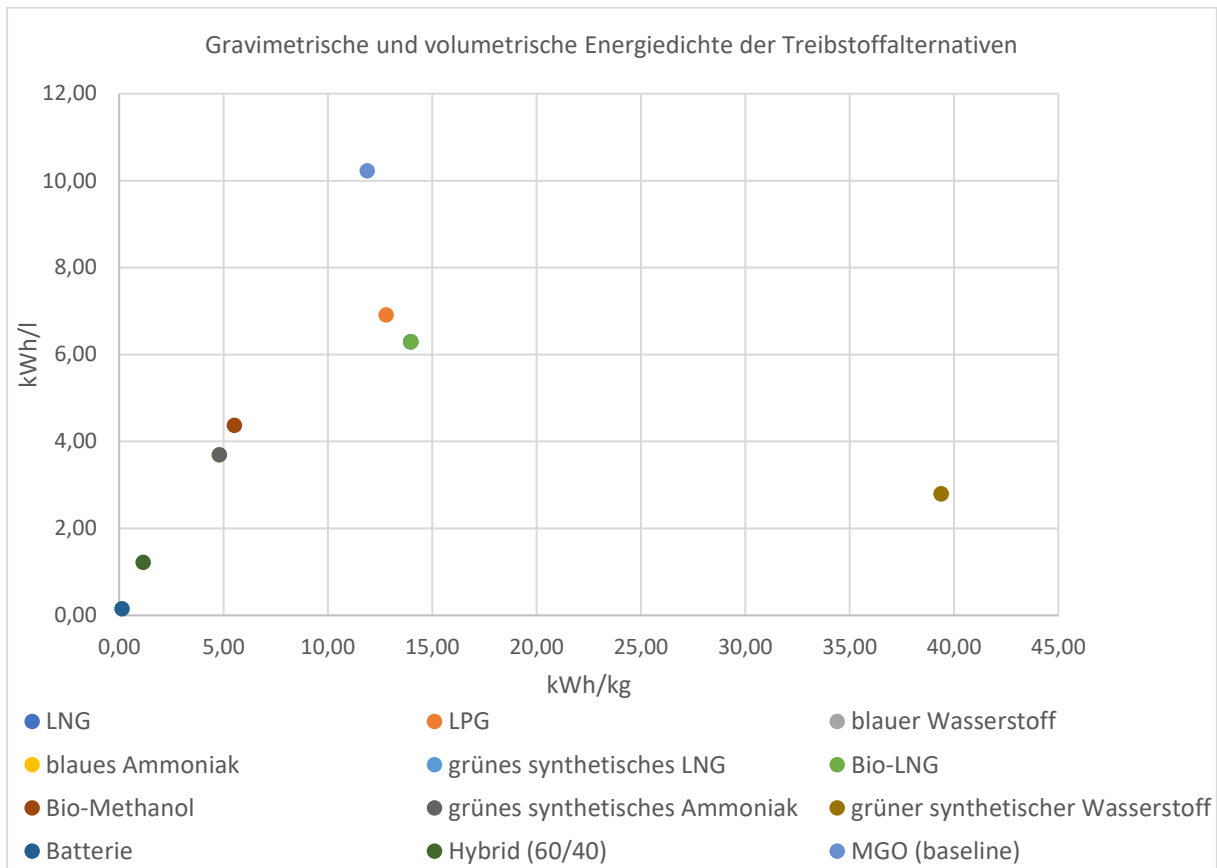


Abbildung 5: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte der Treibstoffalternativen

Abgesehen von den bereits diskutierten Unterschieden lassen sich die Treibstoffe in eine weitere Einteilung klassifizieren. Diese bezieht sich auf Speicherverluste bzw. Verluste von Treibstoff während der Nutzung. Für diese Klassifizierung wird der Aggregatzustand der Treibstoffe bei Raumtemperatur betrachtet. Treibstoffe, die bei dieser Temperatur flüssig vorliegen, weisen vernachlässigbare Verluste bei der Speicherung und je nach Motoreinstellung geringe Verluste bei Verbrennung auf. Hierzu zählt das bisher genutzte MGO ebenso wie Bio-Methanol. Treibstoffe, die in Drucktankbehältern an Bord aufbewahrt und womöglich sogar noch gekühlt werden müssen, müssen oft bei zu starker Erwärmung durch hohe Außentemperaturen oder direkte Sonneneinstrahlung durch Überdruckventile in die Außenwelt abgegeben werden, um die Sicherheit des Betankungssystems garantieren zu können. Zusätzlich zu den Ablassverlusten bei Erhitzung spielt bei

Wasserstoff die hohe Diffusionsrate, die durch seine geringe Molekülgröße hervorgerufen wird, eine entscheidende Rolle. Durch sie fallen die Bunkerverluste deutlich höher aus als die der anderen bei Raumtemperatur gasförmigen Treibstoffe.

Der Seilbetrieb hat in seiner Funktion eine grundlegende Charakteristik. Das Gewicht der Fähre würde sich durch die fehlenden Motoren und das nicht notwendige Betankungssystem stark reduzieren. Der operative Betrieb wird jedoch durch die deutlich schlechtere Manövrierfähigkeit maßgeblich eingeschränkt. Zusätzlich ist der Seilbetrieb weder über eine Verankerung im Fluss noch durch eine Führungstrasse über diesen baulich möglich bei einer Fähre dieser Größe. Grund hierfür ist sowohl der Binnenschiffsverkehr auf dem Rhein, der so massiv gestört würde, als auch die Größenlimitierung einer Rollfähre. Aufgrund von diesem drastischen Mangel an Umsetzbarkeit bezogen auf die für den Betrieb notwendige Infrastruktur muss diese alternative Antriebstechnologie von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden.

Tabelle 3: Dimensionierung der Tanks für die verschiedenen Treibstoffalternativen bei gleichbleibenden Betankungszyklen - Fähre Linz-Remagen

Treibstoff	kWh/kg	kWh/l	Bedarf an kWh brutto pro Tag	l pro Tag	l bei aktueller Betankung	kg pro Tag	kg bei aktueller Betankung
LNG	13,98	6,29	8793,84	1397,85	19569,83	629,03	8806,42
LPG	12,80	6,91	8793,84	1272,26	17811,61	687,02	9618,27
blauer H ₂	39,39	2,80	7130,14	2549,49	35692,91	181,01	2534,20
blaues Ammoniak	4,80	3,70	7130,14	1929,15	27008,12	1485,45	20796,25
grünes synthetisches LNG	13,98	6,29	8793,84	1397,85	19569,83	629,03	8806,42
Bio-LNG	13,98	6,29	8793,84	1397,85	19569,83	629,03	8806,42
Bio-Methanol	5,53	4,37	8793,84	2012,92	28180,88	1590,21	22262,90
grünes synthetisches Ammoniak	4,80	3,70	7130,14	1929,15	27008,12	1485,45	20796,25
grüner synthetischer H ₂	39,39	2,80	7130,14	2549,49	35692,91	181,01	2534,20
Batterie	0,14	0,15	4278,09	28520,58	399288,05	30557,76	427808,63
Hybrid (60/40)	1,16	1,22	6248,00	5113,43	9793,43	5402,56	9427,36
MGO (baseline)	11,89	10,23	9202,86	900,00	12600,00	774,00	10836,00

Tabelle 4: Dimensionierung der Tanks für die verschiedenen Treibstoffalternativen bei gleichbleibenden Betankungszyklen - Fähre St. Johannes

Treibstoff	kWh/kg	kWh/l	Bedarf an kWh brutto pro Tag	l pro Tag	l bei aktueller Betankung	kg pro Tag	kg bei aktueller Betankung
LNG	13,98	6,29	5862,56	931,90	13046,55	419,35	5870,95
LPG	12,80	6,91	5862,56	848,17	11874,40	458,01	6412,18
blauer H ₂	39,39	2,80	4753,43	1699,66	23795,28	120,68	1689,46
blaues Ammoniak	4,80	3,70	4753,43	1286,10	18005,41	990,30	13864,17
grünes synthetisches LNG	13,98	6,29	5862,56	931,90	13046,55	419,35	5870,95
Bio-LNG	13,98	6,29	5862,56	931,90	13046,55	419,35	5870,95
Bio-Methanol	5,53	4,37	5862,56	1341,95	18787,25	1060,14	14841,93
grünes synthetisches Ammoniak	4,80	3,70	4753,43	1286,10	18005,41	990,30	13864,17
grüner synthetischer H ₂	39,39	2,80	4753,43	1699,66	23795,28	120,68	1689,46
Batterie	0,14	0,15	2852,06	19013,72	266192,03	20371,84	285205,75
Hybrid (60/40)	1,16	1,22	4165,33	3408,95	6528,95	3601,71	6284,91
MGO (baseline)	11,89	10,23	6135,24	600,00	8400,00	516,00	7224,00

4.4 Wirtschaftlichkeit

Für eine erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die verschiedenen Treibstoffalternativen bezüglich ihrer aktuellen und prognostizierten Beschaffungskosten, der Kosten für Motoren, Tanks etc., sowie der Kosten der Betankungsinfrastruktur miteinander verglichen. Dabei werden die Kosten der verschiedenen Treibstoffe in Euro/kWh dargestellt. Die zukünftigen Preise der benötigten Treibstoffe werden auf Basis von Prognosen für die Jahre 2030 und 2050 mit den aktuellen Treibstoffkosten linear interpoliert. Die Kosten für die Beschaffung der für die verschiedenen Treibstoffe benötigten Motoren sowie die zusätzlich benötigte Infrastruktur werden in Euro/kW angegeben und auf die benötigte Größe der Fähre skaliert. Um eine Bewertung aus heutiger Sicht zu ermöglichen, wird eine Barwertbetrachtung herangezogen. Treibstoffe und Antriebskonzepte, die keine Emissionsreduktion gegenüber dem aktuellen Status quo liefern sowie Alternativen, die sich aus der Erkenntnis der vorigen Kapitel als

nicht machbar erwiesen, werden von der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung aus eben diesem Grund ausgeschlossen. Zusätzlich wird der am 13.06.2022 geltende Umrechnungskurs von Euro in USD zur Umrechnung verwendet (1 USD = 0,96 Euro). Es wird für die Betrachtung von einer wirtschaftlichen Nutzungsdauer von 25 Jahren ausgegangen. Ein weiteres Bewertungskriterium bildet der Preis in Euro pro vermiedener Tonne CO₂ bei Verwendung der jeweiligen Technologie. Das Urteil der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung setzt sich aus drei wesentlichen Komponenten zusammen. Zuerst werden die voraussichtlichen grob approximierten Kosten der Neubeschaffung der benötigten Komponenten berechnet. Diese Kosten werden auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer verteilt und abgeschrieben. Im Anschluss wird geprüft, wie hoch die jährlichen variablen Kosten ausfallen. Sie setzen sich für diese Studie aus approximierten Wartungs-, Instandhaltungs- und Treibstoffkosten zusammen. Die berechneten Werte sind in der folgenden Tabelle 5 dargestellt. Die Kosten für die Schiffsbasis ohne Motoren, Tanks etc. werden für alle Alternativen als konstant angenommen⁷⁴.

Die zitierten wissenschaftlichen Arbeiten enthalten Preisstrukturen, die vor dem Russland-Ukraine-Krieg und dessen Auswirkungen auf die Rohstoffmärkte geschätzt wurden. Zur besseren Vergleichbarkeit der anderen Treibstoffe werden die approximierten Werte für LNG, grünes synthetisches LNG, Bio-LNG und LPG in der folgenden Tabelle 5 trotzdem dargestellt. Es ist jedoch anzumerken, dass nicht absehbar ist, mit welcher Dynamik sich die Preise dieser Rohstoffe entwickeln werden. Trotz der Möglichkeit der lokalen Erzeugung von Bio-LNG und grünem synthetischen LNG werden mit hoher Wahrscheinlichkeit durch massive Rohstoffengpässe auch die Preise dieser Treibstoffe stark steigen. Eine Investition in eine Antriebstechnologie, die diese Treibstoffe benötigt, wird als riskant eingestuft. Aus diesem Grund werden diese Kraftstoffe nach der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht weiter berücksichtigt und in dieser nicht diskutiert.

Tabelle 5: Untere und obere Grenze für die Gesamtkosten der jeweiligen Treibstoffalternativen

	Jährliche Kosten gesamt		€ pro vermiedener Tonne CO ₂	
blauer H ₂	635.404,97 €	662.745,49 €	302,40 €	315,42 €
grüner synthetischer H ₂	763.632,39 €	921.049,67 €	352,46 €	425,12 €
Hybrid (60% Grünstrom)	241.034,39 €	271.549,03 €	185,42 €	208,89 €

⁷⁴ Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“, 8.

Bio-Methanol	306.271,12 €	530.223,35 €	141,36 €	244,73 €
blaues Ammoniak	400.079,39 €	494.637,19 €	238,34 €	294,67 €
grünes synthetisches Ammoniak	508.580,14 €	685.651,97 €	245,97 €	331,60 €
LNG	305.664,51 €	305.664,51 €	690,07 €	690,07 €
grünes synthetisches LNG	629.958,14 €	903.580,44 €	296,02 €	424,60 €
Bio-LNG	329.833,40 €	329.833,72 €	152,24 €	152,24 €
LPG	219.773,71 €	219.773,71 €	489,08 €	489,08 €

Tabelle 5 gibt für alle Treibstoffalternativen, die bisher nicht eliminiert worden sind, eine Spanne der geschätzten betrachteten jährlichen Kosten und die hieraus resultierende Spanne der errechneten Kosten pro eingesparter Tonne CO₂ an. Die Berechnungsgrundlagen sind Tabelle 6 zu entnehmen. Die detaillierte Aufschlüsselung der Rechnung ist im Anhang zu finden.

Blauer und grüner synthetischer Wasserstoff sind die teuersten betrachteten Treibstoffalternativen bezogen auf die durchschnittlichen jährlichen Kosten. Grund hierfür sind die hohen Anschaffungskosten für Motor, Tank und Brennstoffzellen, aber auch die hohen variablen Kosten des Wasserstoffs selbst. Allein die Beschaffungskosten der notwendigen Infrastruktur auf der Fähre, welche benötigt wird, um diese mit Wasserstoff zu betreiben, fallen den Schätzungen nach sechs Mal so hoch aus wie beim Betrieb mit Biodiesel, da hier unter anderem auch auf die alten Tanks zurückgegriffen werden kann. Diese Beobachtung resultiert aus der enormen benötigten Tankgröße und der vergleichsweise kurzen technischen Lebensdauer der Brennstoffzellenelemente. Trotz der hohen Kosten, die aus dem Fährbetrieb mit grünem synthetischem und blauem Wasserstoff resultieren würden, werden diese Treibstoffalternativen wegen ihrer wahrscheinlich großen zukünftigen Bedeutung von Wasserstoff für den Verkehrs-, aber auch den Energiesektor weiterhin betrachtet. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Betrieb erst ausschließlich mit blauem Wasserstoff und stückweiser mit immer höherer Beimischung von grünem synthetischem Wasserstoff eine Alternative liefert, die die Kosten des Wasserstoffbetriebs zumindest teilweise senken könnte. Durch verschiedene Förderprogramme des Bundes für Wasserstoffgewinnung, Wasserstofftransport und die effiziente Nutzung von Wasserstoff im Verkehrssektor ist eine Etablierung dieses Rohstoffs als künftiger Energieträger denkbar und als politisch gewollt anzusehen. Deshalb wird es für wahrscheinlich gehalten, dass zukünftig die Kosten für die Anschaffung von Brennstoffzellen und Hochdruck- oder Flüssigtanks für Wasserstoff bei deutlich stärkerer Nutzung stark fallen und eine Verwendung somit rentabler wird. Die Schätzung der Erzeugungskosten insbesondere von grünem synthetischem Wasserstoff korreliert durch die in Kapitel 3.2.7 beschriebene Erzeugung stark mit den Strompreisen. Hier sind insbesondere die Opportunitäts-

kosten der Anlagenbetreiber zu betrachten: Sollte es sich als wirtschaftlicher gestalten, den von Solar-, Windkraftwerken, etc. produzierten Strom ins Netz einzuspeisen bzw. direkt zu vermarkten, werden Anlagenbetreiber dies, sofern sie die Möglichkeit dazu haben, tun. Um garantieren zu können, dass ausreichend Wasserstoff produziert wird, muss dieser im Verkaufspreis damit wirtschaftlich gleichgestellt oder sogar teurer gehandelt werden. Dies schließt Wasserstoff als kostengünstigen Energieträger jedoch noch nicht aus. In der Regel herrschen zu Zeiten, in denen die Anlagen, die erneuerbare Energie generieren, stark bis voll ausgelastet sind, geringere börsliche Strompreise. Dies hängt vorrangig mit der vom Bund gewählten Vergütungsstrategie dieser Kraftwerke über die EEG-Umlage zusammen. Erneuerbare Energieträger gehen bei der börslichen Preisfindung, sofern sie durch die EEG-Umlage finanziert werden, mit einem Preis von 0€ in die Merit-Order ein.

Im Folgenden wird auf die Unterschiede der Kostenstruktur der Treibstoffalternativen Hybridbetrieb, synthetisches oder blaues Ammoniak und Bio-Methanol eingegangen.

Die Hybridisierung der Fähre ist laut der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter den verwendeten Annahmen trotz der notwendigen baulichen Maßnahmen bezogen auf die Ladeinfrastruktur die zweit kostengünstigste Alternative. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Große Teile der aktuell verwendeten Infrastruktur können übernommen werden. Zusätzlich ist die Verwendung von Strom als Energieträger kostengünstiger als die Verwendung von durch Strom und andere Rohstoffe hergestellten Treibstoffen. Grund hierfür sind Umwandlungsverluste in der Produktion von E-Fuels. Außerdem kann der notwendige Batteriespeicher vergleichsweise klein dimensioniert werden, da durch den generatorischen Betrieb der Dieselmotoren und die zusätzliche Ladung des Speichers während des operativen Betriebs auch bei kleinerer Größe die Betriebssicherheit sichergestellt ist.

Eine zweite Alternative zu MGO ist Bio-Methanol. In der Kostenbetrachtung ist dieses die günstigste Möglichkeit der Emissionsreduktion. Durch seinen niedrigen Flammpunkt muss bei Verwendung dieses Treibstoffs auf bestimmte Sicherheitskriterien eingegangen werden, wie z.B. doppelwandige Rohrleitungen bei zugänglichen Räumen, ggf. inertisierte Tanks oder Tankarmaturen mit Flammdurchschlagsicherung. Dies verhindert die Weiternutzung der aktuell verbauten Tanks und Rohrleitungen. Perspektivisch rüsten Container Reedereien, wie die dänische Reederei Maersk, einen Teil ihrer Flotte auf Methanol-Betrieb um oder bestellen neue Schiffe mit Methanol-Antrieb. Sollte die Nutzung von Methanol als Treibstoff im maritimen Sektor stärker voranschreiten, könnten sich auch hier, ähnlich wie beim Wasserstoff, Skalierungseffekte bezüglich der Motorenkosten und der auf dem Schiff benötigten Tanks und Rohrleitungen sowie

der Treibstoffkosten ergeben. Die reinen Treibstoffkosten für einen Bio-Methanol-Betrieb der Rheinfähren zwischen Linz und Kripp sind im Vergleich der vier verbleibenden Alternativen am geringsten.

Grünes synthetisches Ammoniak und blaues Ammoniak werden, ähnlich wie grüner synthetischer Wasserstoff und blauer Wasserstoff, in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammen analysiert, um die durch den Treibstoffwechsel erzeugten Mehrkosten zu begrenzen. Ammoniak ist von den betrachteten Alternativen – abgesehen vom Wasserstoff – die mit Abstand teuerste. Der Betrieb mit synthetischem Ammoniak kann laut Schätzungen die Kosten des Betriebs mit blauem Wasserstoff übersteigen. Auch hier wäre der Betrieb anfangs mit blauem Ammoniak und immer höherer Beimischung von grünem synthetischem Ammoniak über die Zeit denkbar. Laut DNV, einem großen technischen Dienstleister für die Schifffahrt mit Sitz in Norwegen, ist Ammoniak die Treibstoffalternative mit dem höchsten Potenzial. Bis 2050, schätzt er, könnte sein Anteil im Energieträgermix bei Binnen- und Hochseeschiffen auf 25 Prozent anwachsen. Hierdurch könnten langfristige Anreize geschaffen werden, die durch die weite Verbreitung wieder Skaleneffekte und somit Kostenreduktion von benötigten Bauteilen und auch des Treibstoffs selbst mit sich brächten.

Die geschätzten Kosten für Tanks, Rohrleitungen etc. sind von allen betrachteten Alternativen nach Wasserstoff die zweithöchsten. Auch die approximierten Kosten für den Treibstoff selbst sind deutlich höher als die für Bio-Diesel und Bio-Methanol. Trotz seines hohen Potenzials muss Ammoniak als Treibstoff für die Rheinfähren deshalb aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden und wird nicht vertieft untersucht.

Tabelle 6: Technische Daten der Treibstoffalternativen

Treibstoff	Beschaffungspreis Motor	Beschaffungspreis Tanks und weitere	Preis von (€/t)	Preis bis (€/t)	kWh/kg	Preis (€/MWh) berechnet aus	Jährliche Wartungs- & Betriebskosten in %	Preisprognose 2030 (€/MWh) ^d	Preisprognose 2050 (€/MWh) ^e	Wirkungsgrad ^a
LNG (Dual)	768,00	576,00	364,80 ^k		13,98	26,09	12,00%	26,09*	26,09*	45%
LPG	576,00	192,00	441,60 ^l		12,80	34,50	12,00%	34,5*	34,5*	45%
H ₂ blau	1440,00	1152,00	4840,00 ^m		39,39	122,87	12,00%	79,49 - 138,24	65,66 - 117,50	55,5%
Blaues Ammoniak	768,00	576,00	332,10 ⁿ	479,00 ^g	4,80	69,19 - 99,79	12,00%	89,86 - 148,61	79,49 - 131,33	55,5%
Grünes synthet. Methan	768,00	576,00	1296,00 ^o	2880,00 ^h	13,98	92,70 - 206,00	12,00%	207,36 - 338,69	145,15 - 238,46	45%
Bio-LNG	768,00	576,00	693,12 ^p		13,98	49,58	12,00%	36,73	22,24 ^c	45%
Bio-Methan	576,00	192,00	320,00 ^q	770,00 ⁱ	5,530	57,56 - 139,24	12,00%	72,58 - 138,24	86,4 - 279,94	45%
Grünes synthet. Methan	768,00	576,00	600,00 ^r	800,00 ^j	4,80	125,00 - 166,67	12,00%	162,43 - 283,39	103,68 - 190,08	55,5%
Grüner synthet. Methan	1140,00	1152,00	8560,00 ^s		39,39	217,31	12,00%	152,06 - 273,02	96,77 - 179,71	55,5%
Batterie	129,60 ^w	480,00 ^u			0,14 ^f	48,00 - 96,00	12,00%	28,00 - 79,68	19,20 - 48,00	92,5%

-
- ^a Law u. a., „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“.
- ^b „Techno Economic Assessment of Zero Carbon Fuels“.
- ^c „Lloyds-Register_2019_Fuel-production-cost-estimates-and-assumptions-report.pdf“.
- ^d „Techno Economic Assessment of Zero Carbon Fuels“.
- ^e Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“.
- ^f „batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf“.
- ^g „Techno-Economic Assessment of Blue and Green Ammonia as Energy Carriers in a Low-Carbon Future | Elsevier Enhanced Reader“.
- ^h Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“.
- ⁱ Gielen u. a., „Innovation Outlook: Renewable Methanol“.
- ^j Wang u. a., „Can Sustainable Ammonia Synthesis Pathways Compete with Fossil-Fuel Based Haber-Bosch Processes?“.
- ^k Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“.
- ^l Lindstad u. a.
- ^m „Hydex - Wasserstoff-Index - Euro/kg - Marktdaten - energate messenger+“.
- ⁿ „Techno-Economic Assessment of Blue and Green Ammonia as Energy Carriers in a Low-Carbon Future | Elsevier Enhanced Reader“.
- ^o „Techno-Economic Assessment of Blue and Green Ammonia as Energy Carriers in a Low-Carbon Future | Elsevier Enhanced Reader“.
- ^p „Lloyds-Register_2019_Fuel-production-cost-estimates-and-assumptions-report.pdf“.
- ^q Gielen u. a., „Innovation Outlook: Renewable Methanol“.
- ^r Wang u. a., „Can Sustainable Ammonia Synthesis Pathways Compete with Fossil-Fuel Based Haber-Bosch Processes?“.
- ^s „Hydex - Wasserstoff-Index - Euro/kg - Marktdaten - energate messenger+“.
- ^t Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“.
- ^u „batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf“.
- ^v Lindstad u. a., „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“.
- ^w Wahl und Kallo, „Carbon Abatement Cost of Hydrogen Based Synthetic Fuels – A General Framework Exemplarily Applied to the Maritime Sector“.

4.5 Zwischenfazit

Zu Beginn der Studie wurde eine breite Vielfalt von verschiedenen Treibstoffen für die zukünftige Verwendung auf der Rheinfähre Linz-Remagen in Betracht gezogen. Darunter fallen die fossilen Treibstoffe LNG, LPG, graues Methanol, blauer und grauer Wasserstoff, blaues Ammoniak, die synthetischen aus erneuerbaren Energien gewonnenen Treibstoffe grüner synthetischer Wasserstoff, grünes synthetisches LNG und grünes synthetisches Ammoniak, die biologischen Treibstoffe Bio-LNG, Bio-Diesel, Bio-LPG, Bio-Methanol und die alternativen Antriebskonzepte Batteriebetrieb, Seilbetrieb, Hybride, Scrubber (Entschwefelung), Generatordimensionierung und auch der Motorenwechsel. Auf Basis dieser Auswahl wurde iterativ eine Bewertung dieser Varianten bezüglich ihrer potenziell umsetzbaren Emissionsreduktion, der Möglichkeiten und des Aufwands für Nachrüstung, Umbau oder Neuanschaffung, der Problematiken bei vor- und nachgelagerter Infrastruktur und der Wirtschaftlichkeit vorgenommen. Der Bewertungs- und Ausschlussprozess ist zusammengefasst in Abbildung 6 dargestellt.

Durch ihr fehlendes Emissionsminderungspotential wurden graues Methanol, grauer Wasserstoff, ein Motorenwechsel und der Verbau eines Scrubbers (Abgasentschwefelungsanlage) von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Nach Untersuchung der vor- und nachgelagerten Infrastruktur wurden der Seilbetrieb wegen der fehlenden Umsetzbarkeit vor Ort und der Batteriebetrieb aufgrund der deutlich geringeren Energiedichte dieser Speichertechnologie verglichen mit den anderen betrachteten Treibstoffalternativen verworfen. Zusätzlich wurde Bio-Diesel ebenfalls von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen aufgrund erheblicher Behinderung des operativen Betriebs. Aufgrund der unklaren zukünftigen Beschaffungssituation, die aus dem Russland-Ukraine-Krieg resultiert, wurden LNG und LPG als mögliche Alternativen ausgeschlossen. Zusätzlich wurden die Treibstoffe grünes synthetisches LNG, Bio-LNG und Bio-LPG verworfen, da bei Knappheit der fossilen Alternativen Industriezweige mit höherer Wertschöpfung auf grüne Alternativen umsteigen müssen und so starke Preissteigerungen dieser die Folge sein können. Im Anschluss wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verbleibenden Alternativen vorgenommen. Aus dieser resultierte der Ausschluss von grünem synthetischem und blauem Ammoniak.

Die beschriebenen Argumentationen sind detaillierter in den vorherigen Kapiteln zu finden. Aus der Betrachtung resultieren drei Konzepte, die im Folgenden tiefergehender untersucht werden. Bei diesen Konzepten handelt es sich um den Betrieb der Fähre mit blauem und grünem synthetischem Wasserstoff, die zukünftige Verwendung von Bio-Methanol oder eine Hybridisierung der Fähre. Die

nähere Betrachtung dieser drei Konzepte erfolgt ab Kapitel 6. Im nachfolgenden Kapitel 5 werden zunächst Teilmaßnahmen und Ansätze der Emissionsreduktion durch Digitalisierung beschrieben.

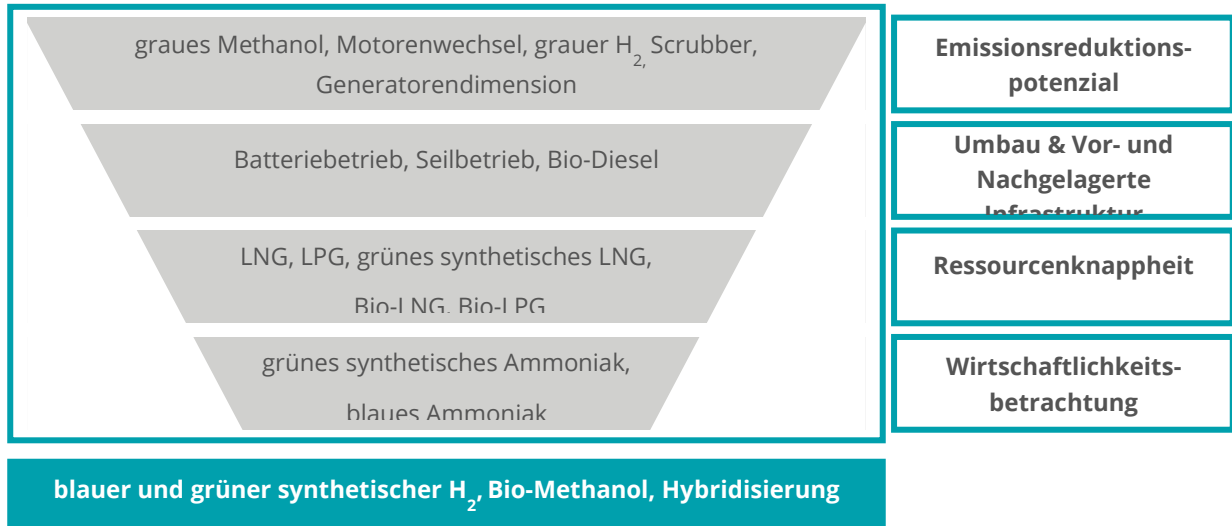


Abbildung 6: Zusammenfassung der Ausschlussgründe für die betrachteten Antriebstechnologien

5. Teilmaßnahmen und Ansätze der Emissionsreduktion durch Digitalisierung

Da Emissionsreduktion als ganzheitliches Konzept in der Machbarkeitsstudie untersucht werden soll, muss insbesondere die alltägliche Nutzungssituation mit betrachtet werden. Hier gilt es, durch eine effizientere Auslastung der Fähre und der Prozesse, Emissionen gesamtheitlich zu senken. Die folgenden Teilmaßnahmen dienen als Denkanstöße, deren tatsächlicher Emissionsminderungsgrad später empirisch geprüft werden muss. Diese Prüfung kann durch NutzerInnenbefragungen oder durch stichprobenartige Erfassungen der Auslastung vor und nach dem Start der Teilmaßnahme erfolgen. Um den Erfahrungsaustausch über das Projekt hinaus zu gewährleisten, ist darauf zu achten, dass die Umsetzung der verschiedenen Digitalisierungsteilmaßnahmen als Open-Source Software-Lösungen erfolgt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die entwickelten Lösungen mit dem Anspruch der höchstmöglichen Standardisierung auch in Bezug auf die benötigten Schnittstellen konzipiert werden und eine nachvollziehbare Dokumentation ebenfalls Umfang der ausgeschriebenen Leistungen ist.

Eine kompakte Version der Teilmaßnahmen ist im Anhang in den Kapiteln 10.5 bis 10.12 zu finden.

5.1 Wartezeitanzeige als Webanwendung / App

Die Fähre fährt im Pendelverkehr zwischen den Orten Linz am Rhein und Kripp, das bedeutet, es gibt keine festen Anfahrzeiten bzw. keinen Fahrplan, da dies aufgrund des Längsverkehrs auf dem Rhein nicht möglich ist. Nutzer haben eine eingeschränkte Transparenz, wann die Fähre genau abfährt. Bei der Webanwendung zur Wartezeitanzeige handelt es sich um die Weiterentwicklung des vorhandenen Live-Streams der Fähre. Im Vordergrund stehen hier die einfache Bedienbarkeit und Erreichbarkeit der Anwendung sowohl von mobilen Endgeräten als auch von Computern aus. Das existierende Kamerasystem, das bis jetzt diese Aufgabe erfüllen soll, sei nicht schnell und einfach genug vom Smartphone aus zu erreichen, so TeilnehmerInnen der ZukunftsWerkStadt. Zusätzlich könnte neben der Lage der Fähre auf Basis von Messtechnik und erfassten Fahrtendaten langfristig eine Warte prognose implementiert werden, die angeben soll, wann die Fähre auf der jeweiligen Seite ungefähr anlegen wird. Ob die Installation dieser Messtechnik in Relation zur Verbesserung der Güte der Prognosen steht, ist zu diskutieren. Implementierungen als alleinstehende Applikation oder eingebunden in eine teilmaßnahmenübergreifende Anwendung wären denkbar. Hier könnte auf bestehende Systeme zurückgegriffen werden und

aus diesem Grund wäre mit hoher Wahrscheinlichkeit keine neue Hardware notwendig.

5.2 Wartezeitanzeige auf der B42

Bei dieser Maßnahme handelt es sich um eine Anzeige, die den KundInnen schnell und einfach darstellen soll, auf welcher Seite sich die Fähre zum Zeitpunkt befindet beziehungsweise in welche Richtung die Fähre fährt. Die Zielgruppe dieser Wartezeitanzeige sind VerkehrsteilnehmerInnen, die insbesondere durch die geografischen Begebenheiten auf der Linzer Seite keine oder schlechte Sicht auf den Fährbetrieb haben. Die Wartesituation soll für eben diese NutzerInnen angenehmer gestaltet werden. Die Anzeige soll so platziert werden, dass KundInnen, die keine Einsicht auf die Fähre haben, mit Informationen über den Betrieb wie beispielsweise die aktuelle Lage der Fähre, die approximiert prognostizierte Wartezeit sowie Ausfälle der Fähre versorgt werden. Die Umsetzung dieser Teilmaßnahme soll primär die Wartesituation auf der Linzer Rheinseite verbessern. Die gute Einsicht auf die Anzeigetafel für KundInnen, welche auf der B42 warten, ist damit eine zentrale Anforderung für die Platzierung dieser. Durch die genannten Angaben soll KundInnen eine transparentere Wartezeit ermöglicht werden.

5.3 Echtzeit-Videoübertragung der Wartesituation

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ist der Wartebereich, insbesondere auf der Linzer Rheinseite nicht vollständig einsehbar. Dadurch ist es dem Schiffsführer und dem Einweisungspersonal nicht möglich abzuschätzen, wie viele Fahrzeuge warten und um welchen Fahrzeugtyp es sich handelt. Dies ist insbesondere hinsichtlich der Anzahl und Größe der wartenden LKW und Transporter relevant. Um die Fähre besser auszulasten und das Gewicht optimal zu verteilen, kann ab und zu nachträgliches Rangieren und Umparken erforderlich sein. Dadurch verlängert sich der Einschiffungsprozess und damit der Gesamtablauf.

Eine Übertragung von Echtzeit-Kamerabildern, die den gesamten Wartebereich auf mobilen Endgeräten anzeigen, geben dem Fährpersonal einen Überblick über die vollständige Wartesituation. Mit dieser Information können Fahrzeuge im Einschiffungsprozess aktiv eingewiesen werden, sodass eine optimale Gewichtsverteilung und eine Prozessverbesserung erreicht werden. Statt der Nutzung der Information durch das Einweisungspersonal ist auch ein automatisiertes Ampelsystem kurz vor der Auffahrt auf die Fähre denkbar. Die Ampeln zeigen den Fahrzeugen an, auf welche Spur der Fähre sie auffahren sollen. Hierdurch ist ein effizienterer und reibungsfreier Fährbetrieb möglich. Durch diese Teilmaßnahme können sowohl Auslastung als auch Taktung der Fähre erhöht werden. Auch die Emissionseinsparungen durch die bessere Auslastung lassen sich nur empirisch über ein Vorher-Nachher Modell überprüfen. Zusätzlich

muss bei der Umsetzung dieser Teilmaßnahme auf die Einhaltung der Datenschutz-Grundverordnung geachtet werden.

5.4 Vorregistrierung der Kunden in Randzeiten und Vergabe von Fahrzeitfenstern für Randzeiten

Im Rahmen der ZukunftsWerkStadt wurde zur Verbesserung der Wartesituation und zur effizienteren Allokation des Nutzungsverhaltens der TeilnehmerInnen eine Schnittstelle zwischen NutzerInnen und dem Fährbetreiber vorgeschlagen. Über diese Schnittstelle sollen KundInnen die Möglichkeit erhalten, ihre geplanten Nutzungszeitpunkte den Fährbetreibern zur Verfügung zu stellen. Dieses Angebot richtet sich im Vordergrund an KundInnen, die die Fähre täglich oder mehrfach pro Woche zu festen Zeiten nutzen. Die KundInnen können sich so in Fahrzeitfenstern, in denen sie planen, die Fähre zu nutzen, einbuchen. Als unverbindlicher Vorschlag nach Begutachtung des Fährverkehrs sind hier als erster Vorschlag Fahrzeitfenster von ca. 15 – 20 Minuten denkbar.

Während des Reallabors wurde diese Idee erneut aufgegriffen und weitergedacht. Der Fokus dieser Maßnahme liegt nun auf den Randzeiten, in denen die Fähre nicht voll ausgelastet ist. Durch die Voranmeldung könnten die Frequenz reduziert und die Auslastung der Fähre gleichzeitig erhöht werden, was niedrigere Emissionen zur Folge hat. Es sollen Zeitfenster für die Abfahrt festgelegt werden, welche von Nutzern gebucht werden können und in denen der Fährbetreiber eine Beförderung garantiert. Dies soll die Zufriedenheit der Nutzer durch mehr Transparenz und die Reduzierung von Wartezeiten erhöhen sowie die Auslastung der Fähre erhöhen.

Technisch umsetzbar ist diese Maßnahme über eine Erweiterung der Website der Rheinfähre Linz-Kripp GmbH oder eine Einbindung dieser Funktion in eine maßnahmenübergreifende Applikation. Es ist wahrscheinlich, dass zur Umsetzung dieser Teilmaßnahme keine neue Hardware angeschafft werden muss. Unklarheiten, die durch die Voranmeldung und eine verbindliche Nutzung im angemeldeten Zeitraum entstehen, müssen im weiteren Verlauf diskutiert werden. Hier stellt sich die Frage, ob eine solche Verbindlichkeit durchsetzbar und praktikabel ist. Auch muss geklärt werden, ob eine solche Anmeldung schon mit einem Ticketkauf einhergeht und ob dieses dann nur im angemeldeten Zeitraum gültig ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der bisherigen KundInnendaten ist eine Art NutzerInnenlastprofil, das als Basis für eine Auslastungsprognose dienen soll. Diese Prognose soll die KundInnen zuverlässig vorwarnen, zu welchen Uhrzeiten mit einem erhöhten NutzerInnenaufkommen und damit längeren Wartezeiten gerechnet werden muss.

5.5 Weiträumige Anzeigetafeln zur Fährsituation

Bei dieser Teilmaßnahme handelt es sich um eine oder mehrere Anzeigen, die den KundInnen schnell und einfach in Echtzeit darstellen sollen, auf welcher Seite sich die Fähre befindet, beziehungsweise in welche Richtung die Fähre fährt. Da es sich um ein räumlich getrenntes System handelt, ist es relevant, dass die angezeigten Informationen simultan und in Echtzeit auf allen bespielten Tafeln erscheinen. Ziel der Anzeige ist es, die NutzerInnen der Fähre vor dem Ankommen an den Zufahrtsrampen über die ungefähre zu erwartende Wartezeit zu informieren. So sollen die KundInnen frühzeitig mit den für sie notwendigen Informationen versorgt werden und haben die Möglichkeit, längere Wartezeiten durch eine andere Streckenführung zu umgehen. Diese Teilmaßnahme ist eng mit den Teilmaßnahmen 5.1 und 5.2 verknüpft.

5.6 Lückenlose Netzabdeckung

Der Vorschlag für diese Teilmaßnahme stammt aus dem Reallabor. Sie adressiert die Zufriedenheit der FährnutzerInnen und weniger das Emissionsminderungspotential der beiden Fähren der Rheinfähre Linz-Kripp GmbH. Im aktuellen Status Quo existiert ein Funkloch auf dem Rhein. Technisch könnte das Funkloch durch eine Richtantenne oder einen kleinen mobilen Mobilfunkmast behoben werden.

Die durch diese Teilmaßnahme höhere KundInnenzufriedenheit wirkt sich außerdem positiv auf das Arbeitsklima des Personals am Arbeitsplatz aus. Als weiteren Benefit kann die Stadt Linz auf der Anmeldeseite des WLAN-Netzwerks Werbung schalten für künftige Veranstaltungen, Bürgerinitiativen etc., die im Rahmen des Projekts Smarte Region Linz geplant sind, umso mehr BürgerInnen zu erreichen. Alternativ könnten auch lokale Gewerbetreibende die Anmeldeseite als Werbeplattform nutzen.

Das für den operativen Betrieb der Rheinfähre notwendige Netzwerk ist redundant abgesichert. Generell besteht die Sorge, dass es zu Störungen des operativen Betriebsablaufs kommen kann, sobald ein Kunden WLAN eingerichtet ist und sich die Netzwerke gegenseitig behindern. Deshalb ist es wichtig, im Vorfeld eine ausgedehnte Detailuntersuchung durchzuführen, die untersucht, ob der operative Betrieb durch eine solche Maßnahme nicht beeinträchtigt wird.

5.7 Einweisungsunterstützung per LED

Um die Einweisung der Autos auf die Fähre dem hierfür zuständigen Personal zu vereinfachen und die Grundlage für eine zukünftige Teilautomatisierung des Einschiffungsprozesses zu legen, kam im Reallabor die Idee der Nutzung eines beschaltbaren Signalisierungs- und Leitsystems basierend auf Bodenleuchten, die in die Auf- und Abfahrtsrampe sowie auf die Spuren der Fähre integriert werden

könnten, auf. Durch eindeutige Farbcodierung (z.B. rot/grün) soll so den FährnutzerInnen einfach und verständlich kommuniziert werden, auf welche Spur der Fähre sie ihr Fahrzeug lenken sollen. Die Steuerung der Bodenleuchten kann anfangs durch eine Webanwendung oder Applikation erfolgen. Hier sollten sowohl ganze Spuren als auch einzelne Lampen ansteuerbar und schaltbar sein.

Es ist zu prüfen, inwieweit solche beschaltbaren Signalisierungs- und Leitsysteme auf dem Fährdeck angebracht werden können, wie diese mit Strom versorgt werden sollen und wie witterungsbeständig und wartungsintensiv sie sind.

5.8 Bezahlssystem mit kameragestützter Kennzeichenerkennung (LKW)

Ziel und Zweck der Teilmaßnahme des automatischen Check-Ins ist das automatisierte Abwickeln des Bezahlprozesses. Hierfür werden die Kennzeichen der Fahrzeuge, QR-Codes oder andere optisch auslesbare Vignetten, die ins Autofenster geklebt werden können, automatisch von Kameras bei der Auffahrt auf die Fähre erfasst. Hinter den optischen Markern oder Kennzeichen ist ein KundInnenkonto mit dem gewählten Tarif hinterlegt. Dieses KundInnenkonto muss vor der Erstnutzung mit den hierfür relevanten Daten beim Fährbetreiber angelegt werden. Die erkannten Fahrzeuge werden mit der Datenbank des Betreibers abgeglichen und Fahrzeuge, welche diese Bezahlmöglichkeit nutzen, werden identifiziert. Sobald ein/eine NutzerIn gefunden wurde, erfolgt eine direkte Abbuchung des Ticketpreises. Ob diese Abbuchung direkt vom Bankkonto der KundInnen erfolgt oder eine Art Guthaben hinterlegt werden muss, ist noch zu diskutieren. Die KassiererInnen können dann Fahrzeuge, die den optischen Marker tragen, auslassen und müssen so weniger Bezahlvorgänge manuell abwickeln. Sollten als optische Marker die Kennzeichen der Fahrzeuge verwendet werden, ist eine geschickte und einfach handhabbare Datenübermittlung für das Kassierpersonal zu entwickeln.

Für die praktische Umsetzung dieses Systems könnte auf automatisierte kameragestützte Bezahlmethoden für Parkhäuser zurückgegriffen werden, die zum jetzigen Zeitpunkt marktreif existieren. Um ein solches System an Bord zu installieren, wären jeweils ein bis zwei Kameras pro Seite der Fähre sowie ein kleiner Schaltschrank, der die Datenverarbeitung vornimmt, notwendig. Durch die wenigen Bauteile, die neu installiert werden müssen, weist das System so eine unkomplizierte Nachrüstbarkeit vor. Genauere technische Details, wie beispielweise die Fähigkeit der Erkennung mehrerer optischer Marker simultan, die exakte Positionierung auf der Fähre zur Gewährleistung der Erfassung aller auffahrenden Fahrzeuge und die Bereitstellung der benötigten Datenbankinfrastruktur, sind mit den verschiedenen Anbietern dieser Lösungen individuell zu klären. Ebenso muss in Erfahrung gebracht werden, ob sich die Software

wirklich vollständig für den Fährbetrieb adaptieren lässt oder ob weitreichende Anpassungen vorgenommen werden müssten. Bei der Auswahl der Anbieter ist darauf zu achten, dass die gewählten Software-Lösungen als Open-Source bzw. freie Software im Rahmen des Projekts anderen Städten zur Verfügung gestellt werden kann. Für die Realisierung der Zeitersparnis im Kassiervorgang, die aus dieser Teilmaßnahme resultiert, stehen verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten zur Wahl. Wichtig hierbei ist, dass das Kassierpersonal schnell und einfach verifizieren kann, welche NutzerInnen automatisiert abgerechnet wurden und welche noch Tickets lösen müssen. Denkbar wären Plaketten oder Aufkleber zur Verifizierung, die an die FahrzeughalterInnen vergeben werden, welche das System nutzen, Benachrichtigungen, die dem/der KassiererIn die Kennzeichen der schon abkassierten NutzerInnen datenschutzkonform übermitteln oder eine automatische Einweisung der NutzerInnen in eine vorgeschriebene Reihe oder Position auf dem Schiff.

Als Ausbaustufe kann ein intelligentes Bezahlungssystem etabliert werden, das den KundInnen immer den besten Tarif für das gewählte Transportmittel liefert. So können MehrfachnutzerInnen, sobald die Kosten ihrer Einzelfahrten in einem Monat die eines Monatstickets überschreiten, eine Monatskarte automatisch als Tarif auf ihrem KundInnenkonto hinterlegt bekommen. Bei ausreichend verbreiteter Nutzung kann so der Bezahlprozess deutlich vereinfacht und das Bordpersonal, das hierfür zuständig ist, maßgeblich entlastet werden. Auch ist wahrscheinlich, dass durch diese Teilmaßnahme ein reibungsfreier und damit schneller und effektiver Betrieb möglich ist. Um hierüber Sicherheit zu erhalten, muss allerdings erst empirisch getestet werden. Testgruppe für diese Teilmaßnahme können beispielsweise LKWs sein aufgrund der bestehenden Tarifstruktur, da sich diese leicht vom Kassierpersonal identifizieren lassen und die meisten LKWs, die die Fähre nutzen, dies in einer hohen Frequenz und Regelmäßigkeit tun.

6. Konzept 1: Die Pionierlösung - Wasserstoff

6.1 Wirtschaftliche Machbarkeit

Die nachfolgende Tabelle 7 beinhaltet die aufgeschlüsselte Zusammensetzung der bewertungsrelevanten Maßgrößen für grünen synthetischen und blauen Wasserstoff. Sie zeigt auf, auf welcher Zahlengrundlage die durchschnittlichen jährlichen Kosten und die Kosten pro vermiedener Tonne Kohlenstoffdioxid zustande kommen. Hierbei werden die geschätzten Kosten für die initiale Anschaffung und die variablen Kosten, die sich aus den Treibstoffkosten sowie Wartung, Reparatur etc. zusammensetzen, einzeln gelistet. Die Betrachtung erfolgt sowohl für den in der Beschaffung etwas günstigeren blauen Wasserstoff als auch für den aus erneuerbaren Energien gewonnenen grünen synthetischen Wasserstoff einzeln. Durch ihre chemisch gleiche Zusammensetzung und das hieraus resultierende gleiche Antriebsverfahren mittels Brennstoffzelle sind für beide Varianten die geschätzten Anschaffungskosten sowohl für den Antriebsstrang als auch für die Tanks und Rohrleitungen identisch. Für diese Analyse wurde ein Antrieb mit Wasserstoff über eine Brennstoffzelle angenommen, da diese Technologie auch in der Schifffahrt die am weitesten erprobte ist. Eine Verbrennung von Wasserstoff in Hubkolbenmaschinen ist ebenfalls möglich, diese Nutzungsart des Wasserstoffs besitzt zum jetzigen Zeitpunkt jedoch keine ausreichende Marktreife und muss deshalb erst weiter erforscht werden. Für die Abschreibung der Initialinvestition wurde ein Zeitraum von 25 Jahren angenommen. Alle in Kapitel 4.4 getätigten Annahmen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit gelten ebenfalls für diese Betrachtung.

Die variablen Kosten der Treibstoffalternativen wurden unterteilt in Treibstoffkosten und die Betriebskosten exklusive Treibstoff. Für die Betriebskosten exklusive des Treibstoffs gilt wie bei den Fixkosten für beide Wasserstoffarten Kostengleichheit aufgrund identischer benötigter Maschinerie, Bunkerung und Nutzung im Allgemeinen und daraus resultierendem identischem Wartungs- und Reparaturaufwand. Es ist darauf hinzuweisen, dass in verschiedenen Veröffentlichungen die Lebenszeit von Brennstoffzellen, die im maritimen Sektor verwendet werden, mit 3-5 Jahren angesetzt ist. Dies spiegelt sich in den hohen approximierten Betriebskosten exklusive des Treibstoffes wider. Des Weiteren wurde in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von einer Wasserstoffspeicherung in flüssiger Form an Bord ausgegangen. Die unterschiedlichen Beschaffungskosten des Treibstoffs orientieren sich an verschiedenen Kostenprognosen und dienen als obere und untere Grenze des prognostizierten Kostenaufwands.

Tabelle 7: Berechnung der oberen und unteren Grenze der Gesamtkosten - Wasserstoff

Antriebstechnologie	Blauer Wasserstoff		Grüner synthetischer Wasserstoff	
Fixkosten				
Anschaffungskosten Motor	1.644.480,00 €		1.644.480,00 €	
Anschaffungskosten Tanks und weitere Infrastruktur	1.315.584,00 €		1.315.584,00 €	
Summe Fixkosten	2.960.064,00 €		2.960.064,00 €	
Variable Kosten				
durchschnittliche jährliche Betriebskosten exklusive Treibstoff	355.207,68 €		355.207,68 €	
durchschnittliche jährliche Treibstoffkosten (Barwert)	161.794,73 €	189.135,25 €	290.022,15 €	447.439,43 €
Summe variable Kosten	517.002,41 €	544.342,93 €	645.229,83 €	802.647,11 €
Jährliche Kosten gesamt	635.404,97 €	662.745,49 €	763.632,39 €	921.049,67 €
vermiedene Tonnen CO ₂ pro Jahr	2101,18 tCO ₂ /a		2166,58 tCO ₂ /a	
€ pro vermiedener Tonne CO ₂	302,40 €/tCO ₂	315,42 €/tCO ₂	352,46 €/tCO ₂	425,12 €/tCO ₂

In dieser Betrachtung wurden Änderungen im operativen Betriebsablauf nicht berücksichtigt. Es ist wahrscheinlich, dass die benötigten Betankungszyklen bei der Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff kürzer ausfallen. Hier würden je nach Betankungsstrategie weitere Logistikkosten anfallen. Diese Kosten entstehen entweder durch das benötigte Fahrpersonal vor Betriebsbeginn während der Betankung oder die Kapazitätsminderung der Fähre bei Betankung im operativen Betrieb. Sollte die Betankung während der Fahrzeiten erfolgen, kann die Fähre die Spur, auf welcher der Tanklastler die Betankung durchführt, nur zu Teilen oder überhaupt nicht nutzen. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Treibstoffkosten zwischen 25% und 50% der jährlichen Gesamtkosten darstellen. Zur Veranschaulichung sind in Tabelle 8 vier Preisszenarien abgebildet, die ausdrücklich als Sensitivitätsanalyse zu verstehen sind, und lediglich die Kostendynamik bei schwankenden Wasserstoffpreisen aufzeigen sollen. Es ist darauf hinzuweisen,

dass die beiden Tabellen nicht miteinander verglichen werden können, da es sich bei Tabelle 7 um die Durchschnittskostenbetrachtung über einen Zeitraum von 25 Jahren handelt, während in Tabelle 8 lediglich dargestellt ist, inwieweit die Kosten innerhalb eines Jahres schwanken können in Abhängigkeit vom Wasserstoffpreis bei fehlender Betrachtung von Abzinsungseffekten.

Tabelle 8: Jährliche Gesamtkosten für verschiedene Treibstoffkosten - Wasserstoff

Wasserstoffpreis	4 €/kg	6 €/kg	8 €/kg	10 €/kg
Jährliche Gesamtkosten	737.890,77 €	870.031,03 €	1.002.171,29 €	1.134.311,56 €
€ pro vermiedener Tonne CO ₂	340,58 €	401,57 €	462,56 €	523,55 €

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezieht keine Förderungen mit ein. Prinzipiell existieren Förderungen für die nachhaltige Modernisierung von Binnenschiffen. Ob dieses Konzept alle Voraussetzungen für eine Förderung erfüllt, ist zu prüfen.

6.2 Politische und öffentliche Machbarkeit

Die Rheinfähre Linz-Kripp GmbH besitzt eine Vielzahl an Stake- und Shareholdern aus den umliegenden Kommunen und der Wirtschaft. Um die Machbarkeit der Emissionsreduktion umfassend zu überprüfen, ist es wichtig, dass alle wesentlichen Beteiligten so weit wie möglich in den Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden. Zu den lokalen Share- und Stakeholdern zählen alle BürgerInnen, die die Fähre privat oder gewerblich nutzen, die beteiligten Kommunen Linz am Rhein und Remagen, der Fährbetreiber – also die Rheinfähre Linz-Kripp GmbH – sowie viele weitere. Im Rahmen Projekts Smarte Region Linz wurde mit allen oben genannten Parteien in geeigneter Art und Weise kommuniziert, um so eine bedarfs- und bedürfnisgerechte Analyse sicherzustellen. Teile des partizipativen Ansatzes sind in Kapitel 2.2 zu finden.

Wasserstoff bildet einen zentralen Baustein der globalen Energiewende und ist damit ein wichtiger Faktor zur Bekämpfung des menschengemachten Klimawandels. Dabei steht insbesondere der aus erneuerbaren Energiequellen gewonnene grüne synthetische Wasserstoff im Fokus, als Brückentechnologie ist der kohlenstoffdioxidarme blaue Wasserstoff ebenfalls ein Wegbereiter. Deshalb hat eine wachsende Zahl an Staaten eine Wasserstoffstrategie entwickelt. Beim Weltklimatreffen in Glasgow vereinbarten 32 Staaten und die EU, bei der Entwicklung und der Nutzung von Wasserstoff zusammenzuarbeiten. Wasserstoff spielt auch geopolitisch eine wichtige Rolle; viele Staaten, darunter auch Deutschland, sehen in diesem die Chance, die eigene Wirtschaft zu diversifizieren und grüne Energie durch Wasserstoff zu transportieren und zu speichern. Aus diesen Gründen werden viele Fördergelder für den Aufbau einer

Wasserstoffwirtschaft zur Verfügung gestellt. Der Betrieb der Rheinfähre Linz-Remagen mit Wasserstoff würde sich so in eine Vielzahl von Modellprojekten einreihen. Die große Gemeinsamkeit dieser Projekte ist es, die Aufrechterhaltung des Betriebs auf klimaschonende oder klimaneutrale Art und Weise zu gewährleisten. Bundesweite BürgerInnenbefragungen zeigen, dass eine grundsätzliche Offenheit und positive Haltung gegenüber Wasserstoff aus regenerativen Energien und grünen Power-to-X Technologien vorhanden seien. Zugleich werden die Risiken der Technologie von einem Großteil der Befragten als gering bzw. beherrschbar eingeschätzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrnehmung der Öffentlichkeit für die mit Wasserstoff verbundenen Technologien stetig zunimmt und dass auch das Bewusstsein und das Wissen entsprechend wachsen. Studien zeigen, dass sich bei Gewährleistung einer sozial- und vor allem umweltverträglichen Herstellung als auch Herkunft Verbraucher dazu bereiterklären, auch höhere Kosten in Kauf zu nehmen⁷⁵. Der durch eigene Umfragen erhaltene Grundton sowie der bundespolitische Willen zum Ausbau der Wasserstoffwirtschaft abgeleitet aus der Vielzahl der Förderprojekte und die Betrachtung der von verschiedenen Instituten und Vereinigungen durchgeführten Umfragen lassen den Schluss zu, dass Wasserstoff als Antriebstechnologie gesellschaftlich tragbar ist.

6.3 Organisatorische Machbarkeit

Die Umrüstung der Fähre Sankt Johannes und/oder der Rheinfähre Linz-Remagen vom aktuell genutzten MGO hin zum Betrieb mit Wasserstoff stellt die Rheinfähre Linz-Kripp GmbH vor erhebliche organisatorische Hürden. Der Umbau einer Fähre ist ein zeitaufwendiges, komplexes und teures Unterfangen. Zusätzlich gilt für den Fährbetreiber die Maxime „die Fähre fährt immer“, weshalb ein Umbau sorgfältig zu planen ist und auch die Ressourcenverfügbarkeit nach Umbau sowie Reparaturmöglichkeiten regional gewährleistet werden müssen. Ob dies der Fall ist, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch unklar.

Sollte eine Umrüstung auf Wasserstoff als Treibstoff vorgenommen werden, muss dies längerfristig geplant sein. Bevor die hohe Investition in neue Infrastruktur, Motoren etc. auf der Fähre getätigt wird, muss geprüft werden, ob der benötigte Wasserstoff lokal in ausreichender Menge zu annehmbaren Preisen und zu passenden Zeiten betankt werden könnte. Zusätzlich ist zu recherchieren, ob lokal ansässige Dienstleister existieren, die die notwendigen Reparaturen und Wartungen an der neuen Antriebstechnologie durchführen können. Des Weiteren sollte sichergestellt werden können, dass der tägliche Betrieb unter der Umbaumaßnahme nicht leidet. Zusätzlich ist zu diskutieren, ob für die geplante Umbauzeit eine weitere Fähre geliehen werden kann. Ebenso sind Umschulungs-

⁷⁵ Losada, „Wahrnehmung von WasserstoffTechnologien“, 14.

maßnahmen von Teilen des Bordpersonals mit hoher Wahrscheinlichkeit unausweichlich. Dies resultiert aus der enorm unterschiedlichen Handhabung von Wasserstoff gegenüber MGO. Abschließend betrachtet wird der organisatorische Aufwand für diese Umbaumaßnahme als sehr hoch eingestuft.

6.4 Ressourcenbezogene Machbarkeit

Bei der Analyse der ressourcenbezogenen Machbarkeit muss geprüft werden, wie der benötigte Wasserstoff bezogen werden kann, welche speziellen Charakteristiken im Umgang bei der Verwendung dieses Treibstoffs beachtet werden müssen und wie die konkrete Handhabung an Bord ausfallen könnte. Hierbei ist zu beachten, dass die vorgeschlagenen Möglichkeiten auf Basis des aktuellen Kenntnisstands bezogen auf die bauliche Geometrie und Statik der Schiffe keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben und lediglich als Grobkonzept zu verstehen sind. Abschließend wird die Berechnung der potenziellen Emissionsminderung im Vergleich zur aktuellen Situation erläutert.

Es ist anzunehmen, dass die bundesweite Verfügbarkeit von grünem synthetischem Wasserstoff in den kommenden Jahren durch diverse geförderte Projekte immer weiter steigen wird.

Durch lokale Projekte zeichnet sich zumindest perspektivisch eine ausreichende Versorgungssituation ab. Beispiele hierfür sind Bendorf, wo aus erneuerbaren Energien Wasserstoff gewonnen werden soll, der anschließend über den Rhein verschifft werden kann oder das Joint Venture RH₂ine, das sich als Ziel gesetzt hat, der erste europäische Wasserstoffkorridor zu werden, der die notwendige Infrastruktur für Wasserstoff zu Verwendung als Treibstoff ermöglicht. Hier wäre ein Transport von Wasserstoff von einem großen Umschlagshafen am Rhein, wie beispielweise in Köln, nach Linz über Tanklastwagen denkbar. Ob die Beschaffungssituation auch aktuell den Betrieb im benötigten Umfang zulässt, muss weiter geprüft werden.

Stand Mai 2022 existieren keine Vorschriften für die Lagerung von Wasserstoff als Kraftstoff an Bord oder die Verwendung von komprimiertem Wasserstoff als Schiffstreibstoff in der Binnenschifffahrt. Die Bestimmungen in der Binnenschifffahrt, für Brennstoffe mit einem Flammpunkt von 55 °C oder darunter (z.B. Wasserstoff, LNG und Methanol), werden im ES-TRIN (Anlage 8) veröffentlicht. Für den neuen Abschnitt II der Anlage 8 (Brennstofflagerung, Teil 2 – Wasserstoff) sollen zeitnah die schiffsseitigen technischen Anforderungen für das Bunkern und Lagern von tiefkaltem und von unter Druck stehendem Wasserstoff entwickelt werden.

Bestehende Vorschriften für CNG (komprimiertes Erdgas) aus dem maritimen Bereich könnten einen Ausgangspunkt für eine spezifischere Bewertung von

Wasserstoff liefern. Im Allgemeinen werden bei Schiffsanwendungen die benötigten Druckgas- oder Flüssiggastanks einzeln genehmigt. Die verbauten Tankkonstruktionen müssen deshalb auf Basis einer Liste von Anforderungen klassifiziert und bewertet werden. Dies geschieht im maritimen Bereich auf Grundlage der IGC- und IGF-Codes, die der Lagerung von Flüssiggas an Bord von Schiffen einen gesetzlichen Rahmen geben. Diese Tankvorschriften sind ebenfalls für die Bunkerung von Wasserstoff, der zur Verflüssigung abgekühlt wird, rechtlich bindend. Wegen der speziellen physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff, insbesondere aufgrund der niedrigen Speichertemperaturen, sind jedoch noch weiterreichende, zusätzliche Überlegungen notwendig. Der „Interim Recommendations for Carriage of Liquid Hydrogen in Bulk“ ist eine vorläufige Richtlinie des IGC-Codes, die derzeit die Beförderung von Wasserstoff als Ladung im Rahmen eines Pilotprojekts (Australien nach Japan) erlaubt, aber noch nicht Teil des IGC-Codes ist. Für die Beförderung von flüssigem Wasserstoff müssen die Beförderer im maritimen Bereich die SOLAS-Bestimmungen einhalten, welche Mindestanforderungen an den Bau, die Ausrüstung und den Betrieb von Schiffen festlegen. Außerdem müssen Transportunternehmen, die flüssigen Wasserstoff befördern, den IGC-Code einhalten.⁷⁶

In der untenstehenden Abbildung 7 sind Freiräume unter Deck der Fähre gekennzeichnet, in denen potenziell die Möglichkeit besteht, Wasserstofftanks zu platzieren. Alternativ ist auch eine Lagerung an Bord über flexible Containerspeicher möglich. Ob die Leerräume unter Deck für eine Wasserstoffbunkerung geeignet sind, muss explizit, durch ein sachkundiges Ingenieurbüro, geprüft werden. Auch die eigentliche Installationsmachbarkeit muss bewertet werden. Sollte diese für die Flüssigwasserstoffspeicherung negativ ausfallen, ist im Anschluss die Lagerung von Wasserstoff in Hochdrucktanks zu prüfen hinsichtlich benötigter Tankgröße und vorhanden Freiräumen, aber auch der bestehenden Regularien.

⁷⁶ Shaghayegh Kazemi Esfeh u. a., „Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte - Kurzstudie“, 10f.

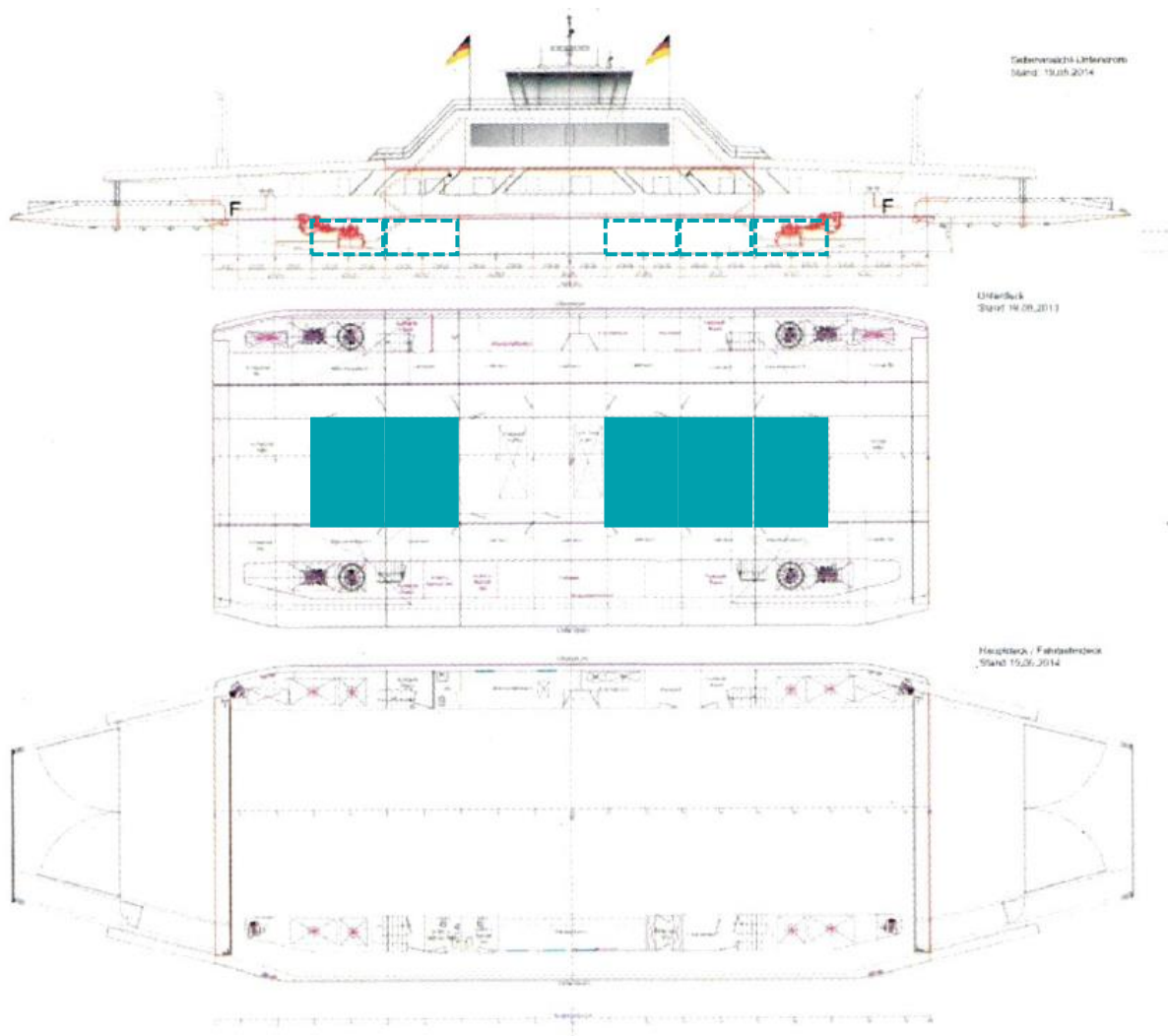


Abbildung 7: Darstellung der Freiräume auf der Fähre Linz-Remagen

Die mögliche Emissionsreduktion wurde auf Basis der vom Fährbetreiber bereitgestellten Daten berechnet. Hier wurde mithilfe der aktuellen Betankungszyklen approximiert, wie hoch der tatsächliche Treibstoffverbrauch der Schiffe ist. Wissenschaftlichen Arbeiten wurden Durchschnittsemissionswerte für MGO bezogen auf Kohlenstoffdioxid entnommen. Unter Berücksichtigung der volumetrischen Energiedichte von MGO konnte aus diesen Werten ermittelt werden, dass die jährliche Kohlenstoffdioxidemission der Fähre bei approximativ 2166,58 t liegt. Diese Berechnung zeigt das enorme Emissionsminderungspotential, den ein CO₂-neutraler oder CO₂-armer Antrieb in diesem Fall durch grünen synthetischen oder blauen Wasserstoff mit sich bringt. In der folgenden Grafik sind die CO₂-Emissionen von blauem und grünem synthetischem Wasserstoff gegenüber den geschätzten CO₂-Emissionen durch den Betrieb mit MGO abgetragen.

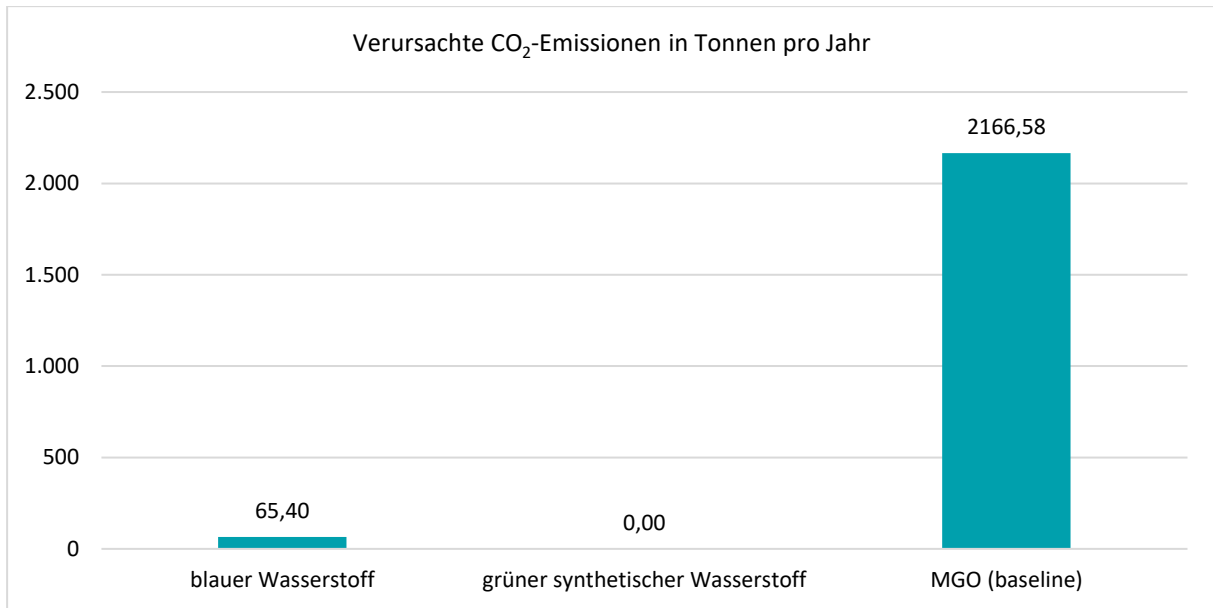


Abbildung 8: Verursachte CO₂-Emissionen in Tonnen pro Jahr - Wasserstoff

7. Konzept 2: Geringster Umrüstkungsaufwand - Bio-Methanol

7.1 Wirtschaftliche Machbarkeit

Die nachfolgende Tabelle 9 beinhaltet die aufgeschlüsselte Zusammensetzung der bewertungsrelevanten Maßgrößen für Bio-Methanol. Sie zeigt auf, auf welcher Zahlengrundlage die durchschnittlichen jährlichen Kosten und die Kosten pro vermiedener Tonne Kohlenstoffdioxid zustande kommen. Hierbei werden die geschätzten Kosten für die initiale Anschaffung und die variablen Kosten, die sich aus den Treibstoffkosten sowie Wartung, Reparatur etc. zusammensetzen, einzeln gelistet. Es besteht die Möglichkeit, dass Bio-Methanol aufgrund seines flüssigen Aggregatzustands bei Raumtemperatur und Normaldruck im aktuellen Motor nach Umrüstungen verwendet werden kann. Die verwendeten Tanksysteme können mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls weiterverwendet werden, allerdings muss der Tank deutlich vergrößert werden, um die aktuellen Betankungszyklen aufrechtzuerhalten. Grund hierfür ist die geringere Energiedichte von Bio-Methanol verglichen mit MGO. Für die Abschreibung der Initialinvestition wurde ein Zeitraum von 25 Jahren angenommen. Alle in Kapitel 4.4 getätigten Annahmen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit gelten ebenfalls für diese Betrachtung.

In der folgenden Tabelle 9 sind die kalkulierten durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten exklusive des Personalaufwands aufgeschlüsselt in ihre Fixkosten bei Anschaffung und ihre durchschnittlichen jährlichen variablen Kosten. Die Fixkosten setzen sich aus den Anschaffungskosten für Motor, Tank und weitere Infrastruktur zusammen. In der Kalkulation wurde zum Zweck der Vergleichbarkeit und der kaufmännisch vorsichtigen Schätzung von der vollständigen Neuanschaffung ausgegangen. Damit liefern die dargestellten Fixkosten eine approximierete obere Kostengrenze. Der variable Kostenanteil besteht aus den durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten exklusive des Treibstoffs und den durchschnittlichen jährlichen Treibstoffkosten. Erste beinhalten Reparatur, Wartung und sonstige Aufwendungen. Bei Betrachtung der Treibstoffkosten ist auffällig, dass die Preisprognosen für Bio-Methanol, auf deren Basis die Kalkulation gemacht wurde, verglichen mit den anderen ursprünglich betrachteten Treibstoffalternativen weit auseinander liegen und so ein breiter Korridor zwischen dem prognostizierten teuersten und günstigsten Szenario entsteht.

Tabelle 9: Berechnung der oberen und unteren Grenze der Gesamtkosten - Bio-Methanol

Antriebstechnologie	Bio-Methanol	
Fixkosten		
Anschaffungskosten Motor	657.792,00 €	
Anschaffungskosten Tanks und weitere Infrastruktur	219.264,00 €	
Summe Fixkosten	877.056,00 €	
Variable Kosten		
durchschnittliche jährliche Betriebskosten exklusive Treibstoff	105.246,72 €	
durchschnittliche jährliche Treibstoffkosten (Barwert)	165.942,16 €	389.894,39 €
Summe variable Kosten	271.188,88 €	495.141,11 €
Jährliche Kosten gesamt	306.271,12 €	530.223,35 €
vermiedene Tonnen CO ₂ pro Jahr	2166,58 tCO ₂ /a	
€ pro vermiedener Tonne CO ₂	141,36 €/tCO ₂	244,73 €/tCO ₂

Bio-Methanol wird in dieser Studie als CO₂-neutral betrachtet, da es in seinem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf das gesamte CO₂, das bei seiner Verbrennung entsteht, vorher gebunden hat. Die Kosten pro vermiedener Tonne CO₂ werden nach der Ermittlung der durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten unter Verwendung der vermiedenen CO₂-Masse berechnet. Hier zeigt sich, dass Bio-Methanol unter den betrachteten Alternativen eine eher kostengünstige darstellt, insbesondere wenn man, was zu überprüfen wäre, den aktuell genutzten Motor durch eine kostengünstige Umrüstung mit dem grünen Treibstoff betreiben kann und somit ein großer Teil der Anschaffungskosten wegfällt.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezieht keine Förderungen mit ein. Prinzipiell existieren Förderungen für die nachhaltige Modernisierung von Binnenschiffen. Ob dieses Konzept alle Voraussetzungen für eine Förderung erfüllt, ist zu prüfen.

7.2 Politische und öffentliche Machbarkeit

Die Zusammensetzung von Stake- und Shareholdern der Varianten unterscheidet sich mit Ausnahme von den für Bau und Wartung möglichen zuständigen Akteuren zwischen den Varianten nicht.

Es besteht eine Vielzahl an Stake- und Shareholdern, zum Beispiel aus den umliegenden Kommunen und der Wirtschaft. Zur Überprüfung der Machbarkeit der Emissionsreduktion ist es wichtig, dass alle wesentlichen Beteiligten bestmöglich in den Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden. Beispiele für lokale Share- und Stakeholder sind alle BürgerInnen, die die Fähre privat oder gewerblich nutzen, die beteiligten Kommunen Linz am Rhein und Remagen, der Fährbetreiber – also die Rheinfähre Linz-Kripp GmbH – sowie viele weitere. Alle oben genannten Parteien wurden im Projekt Smarte Region Linz einbezogen und es wurde mit ihnen in geeigneter Art und Weise kommuniziert, um so eine bedarfs- und bedürfnisgerechte Analyse sicherzustellen.

Bisher wurden keine Akzeptanzbefragungen bezüglich dieser Technologie durchgeführt. Durch die Eigenschaft der Klimaneutralität wird von einer positiven Außenwirkung beim potenziellen Betrieb mit Bio-Methanol ausgegangen, auch wenn durch die starke politische Ausrichtung hin zu Wasserstoff dieser Treibstoff gesamtgesellschaftlich unbekannter ist. Außerdem besteht eine vergleichbar geringe Toxizität von Methanol verglichen zu MGO.

In der Schifffahrtsindustrie hat insbesondere die Ausrichtung von Maersk, der größten Containerschiffreederei der Welt, hin zu Bio-Methanol ein klares Zeichen gesetzt. Laut Henriette Hallberg Thygesen (CEO für Flotte und strategische Marken bei Maersk) bildet grünes Methanol und damit auch Bio-Methanol die einzige marktreife und skalierbare Lösung, die für die Schifffahrt verfügbar ist.⁷⁷ Auch der Motorenhersteller MAN treibt zunehmend die Entwicklung von methanolfähigen Motoren für die maritime Industrie voran, um der wachsenden Nachfrage nach Methanol als einem der Schiffs Kraftstoffe der Zukunft gerecht zu werden. Durch die zunehmende Ausrichtung des Industriezweigs hin zu methanolbetriebenen Schiffen ist ein Prestigegewinn des Kraftstoffs in der breiten Öffentlichkeit wahrscheinlich.

7.3 Organisatorische Machbarkeit

Die Verwendung von Bio-Methanol als Treibstoff anstelle des jetzt genutzten MGOs zieht eine Reihe an Umbaumaßnahmen nach sich, die sich nach jetzigem Kenntnisstand allerdings in einem moderaten Rahmen halten könnten. Dies liegt vorwiegend daran, dass am Motor mit hoher Wahrscheinlichkeit nur die Einspritzdüsen gewechselt werden müssen und dieser neu kalibriert werden muss. Grund hierfür ist die geringere Energiedichte von Bio-Methanol verglichen mit der von MGO, die eine größere Menge an Treibstoff in jedem Zylinder pro Hub bedingt, um dieselbe Motorleistung liefern zu können. Die zweite notwendige Umbaumaßnahme ist eine Tankerweiterung, welche im folgenden Kapitel

⁷⁷ „Maersk geht strategische Partnerschaften für grünes Methanol ein“.

diskutiert wird. Der erwartete geschätzte zeitliche Aufwand dieser Umbaumaßnahmen ist verglichen mit der Alternative des Wasserstoffbetriebs deutlich geringer. Trotzdem muss auch hier wegen der Maxime des Fährbetreibers „die Fähre fährt immer“ sorgfältig geplant werden, wann die beschriebenen Umbaumaßnahmen zu tätigen sind und wie während dieser Zeit der sichere Weiterbetrieb garantiert werden kann.

Bevor die Umrüstung erfolgt, ist zusätzlich zu prüfen, welche zukünftigen Partner Wartungen und anfallende Reparaturen adäquat durchführen können bzw. ob solche lokal überhaupt ansässig sind. Auch das Angebot von Schulungsmaßnahmen, um schnell eine hohe Verfügbarkeit an geschultem Fachpersonal garantieren zu können, ist in einer Detailstudie zu überprüfen. Da Bio-Methanol als Treibstoff zurzeit im maritimen Bereich zwar neu ist, aber stark an Relevanz gewinnt, wird dieses Angebot an Schulungen aktuell als wahrscheinlich gering eingeschätzt, allerdings mit schnellem und starkem Zuwachs.

7.4 Ressourcenbezogene Machbarkeit

Bei der Analyse der ressourcenbezogenen Machbarkeit gilt es zu prüfen, wie das benötigte Bio-Methanol bezogen werden kann, welche speziellen Charakteristiken im Umgang bei der Verwendung dieses Treibstoffs beachtet werden müssen und wie die konkrete Handhabung an Bord ausfallen könnte. Hierbei ist zu beachten, dass die vorgeschlagenen Möglichkeiten auf Basis des aktuellen Kenntnisstands bezogen auf die bauliche Geometrie und Statik der Schiffe keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben und lediglich als grundsätzliche Umsetzungsblaupause zu verstehen sind. Abschließend wird die Berechnung der potenziellen Emissionsminderung im Vergleich zur aktuellen Situation erläutert.

Bio-Methanol bildet eine von vielen Alternativen, die das Ziel haben, die Schifffahrtsbranche emissionsärmer zu gestalten. Durch die geringe volumetrische und gravimetrische Energiedichte des Methanols müssen zumindest die Einspritzdüsen des Motors erneuert werden und mit solchen ausgetauscht werden, die einen höheren Brennstoffdurchsatz ermöglichen, da sonst nicht dieselbe Motorleistung garantiert werden kann. Das Tanksystem ist ebenfalls hiervon betroffen. Um dieselben Tankzyklen wie vor dem Umbau halten zu können, wird der Bio-Methanol-Tank deutlich größer ausfallen müssen als der bisherige MGO-Tank. Dies sollte den Fährbetreiber jedoch vor keine großen Probleme stellen, da unter Deck, zumindest bei der Rheinfähre Linz-Remagen, ausreichend Freiräume zur Verfügung stehen. Die niedrigere gravimetrische Energiedichte hat außerdem den Nachteil, dass, um dieselbe Energiemenge im Tank auf Vorrat zu halten, eine deutlich größere Masse an Treibstoff an Bord zur Verfügung stehen muss. Dies kann sich negativ auf den Tiefgang des Schiffs auswirken, wenn auch nur in kleinem Maße. Die Berechnungen aus Kapitel 4.3

lassen den Schluss zu, dass eine Gesamttankgröße von ca. 30.000 l notwendig ist, um die aktuellen Betankungszyklen zu halten. In der nachfolgenden Grafik sind die theoretisch zur Verfügung stehenden Freiräume, in denen die notwendigen größeren Tanks potenziell untergebracht werden könnten, eingezeichnet. Abgesehen von der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte ähnelt Bio-Methanol stark Diesel hinsichtlich seiner transportrelevanten Eigenschaften. Deshalb können Diesel und Methanol unter ähnlichen Bedingungen gebunkert werden. Es ist allerdings zu beachten, dass Bio-Methanol, ebenso wie fossiles bzw. graues Methanol, erhebliche toxische, entflammbare und reagierende Eigenschaften innehat, die bei falscher Handhabung nachteilige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt haben können. Bei der Handhabung von Methanol ist deshalb besonders auf die Einhaltung der sicherheitsrelevanten Maßnahmen zu achten. Dies gilt sowohl für die Betankung als auch für den täglichen Betrieb. Der IMO OSV Chemical Code gibt eine Handhabung von Methanol im maritimen Bereich vor, an die sich bezüglich der Sicherheitsaspekte und Folgen eines Unfalls dringend zu halten ist.⁷⁸ Zur Risikominimierung für Besatzung, Umwelt und Schiff existieren Richtlinien für die Verwendung von Methanol bzw. Bio-Methanol als Treibstoff. Diese beziehen sich auf die Anordnung, Installation, Steuerung und Überwachung von Maschinen, Ausrüstungen und Systemen auf Schiffen. Die hier relevantesten Richtlinien beziehen sich auf Sicherheitsmaßnahmen bei Leckagen aus dem Tank.⁷⁹

⁷⁸ Marine Safety Forum und Oil Companies International Marine Forum, „The Carriage of Methanol in Bulk Onboard Offshore Vessels“.

⁷⁹ Shaghayegh Kazemi Esfeh u. a., „Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte - Kurzstudie“.

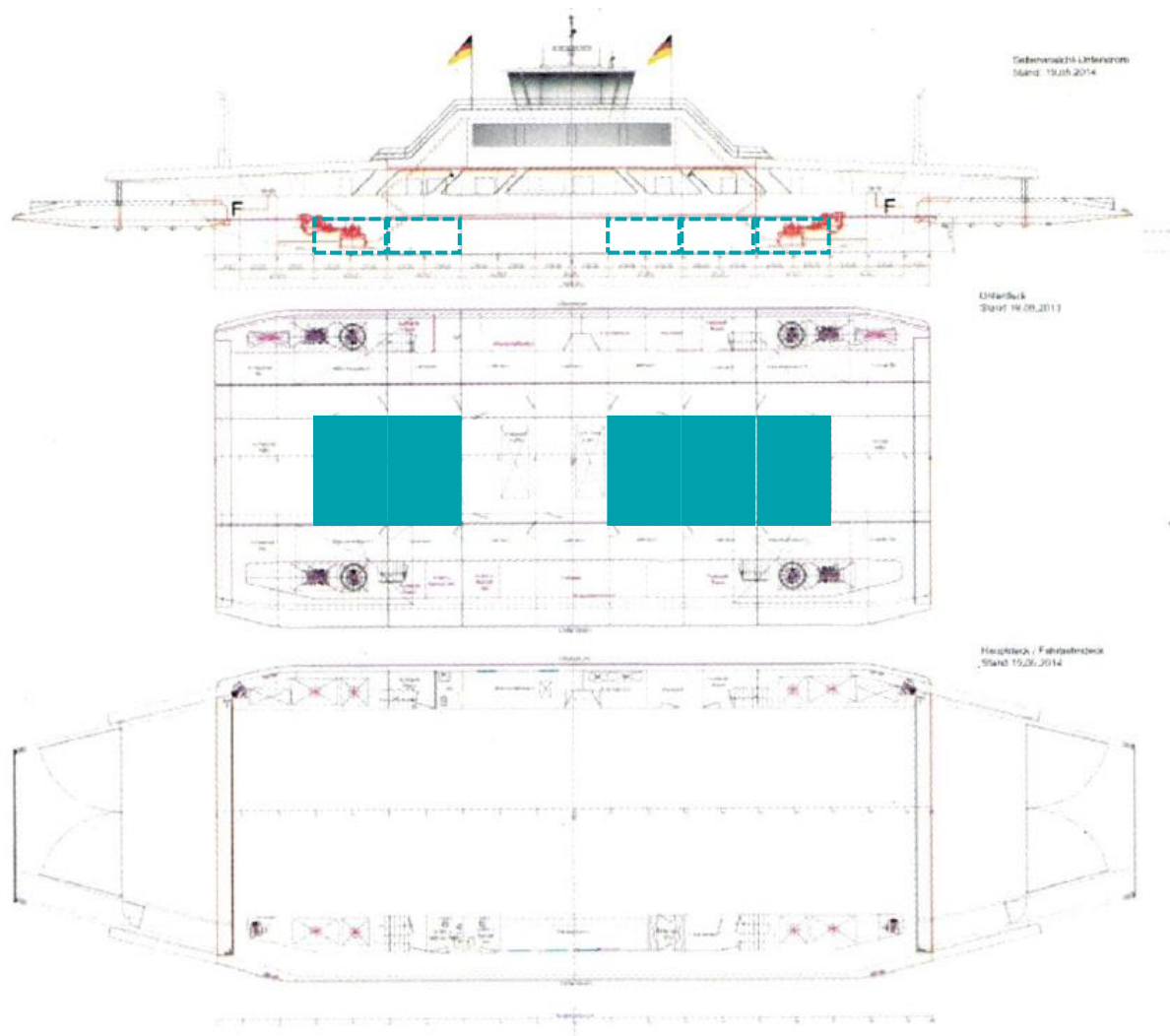


Abbildung 9: Darstellung der Freiräume auf der Fähre Linz-Remagen

Ein zum jetzigen Zeitpunkt zentrales Problem bildet die Beschaffung des Bio-Methanols. Erste industrielle Produktionsanlagen sind in den Niederlanden in Betrieb und auch die Reederei Maersk hat acht Containerschiffe bestellt, die mit Bio-Methanol angetrieben werden sollen.⁸⁰ Auch deren Versorgung ist schon gesichert. Wie bereits bekannt gegeben, wird eine neue Anlage in Dänemark errichtet werden, in der etwa 10.000 Tonnen Methanol auf Basis von erneuerbaren Rohstoffen hergestellt werden können.⁸¹ Weitere Partnerschaften von Maersk mit anderen Unternehmen sichern dem Containerschiffahrtskonzern durch Produktionsanlagen von Bio-Methanol und e-Methanol in China, den USA sowie Südamerika zukünftig Zugang zu über einer Millionen Tonnen des grünen Treibstoffs pro Jahr.⁸²

⁸⁰ Habibic, „World’s 1st Large-Scale e-Methanol Project to Fuel Maersk’s Boxships“.

⁸¹ Bahtić, „Maersk Secures Fuel Supply for 1st Green Methanol-Fueled Ship“.

⁸² „Maersk geht strategische Partnerschaften für grünes Methanol ein“.

Die mögliche Emissionsreduktion wurde auf Basis der vom Fährbetreiber bereitgestellten Daten berechnet. Hier wurde mithilfe der aktuellen Betankungszyklen approximiert, wie hoch der tatsächliche Treibstoffverbrauch der Schiffe ist. Wissenschaftlichen Arbeiten wurden Durchschnittsemissionswerte für MGO bezogen auf Kohlenstoffdioxid entnommen. Unter Berücksichtigung der volumetrischen Energiedichte von MGO konnte aus diesen Werten ermittelt werden, dass die jährliche Kohlenstoffdioxidemission der Fähre bei approximativ 2166,58 t liegt. Diese Berechnung zeigt das enorme Emissionsminderungspotential, den ein CO₂-neutraler Antrieb in diesem Fall durch Bio-Methanol mit sich bringt. In der folgenden Grafik sind die CO₂-Emissionen von Bio-Methanol gegenüber den geschätzten CO₂-Emissionen durch den Betrieb mit MGO abgetragen.

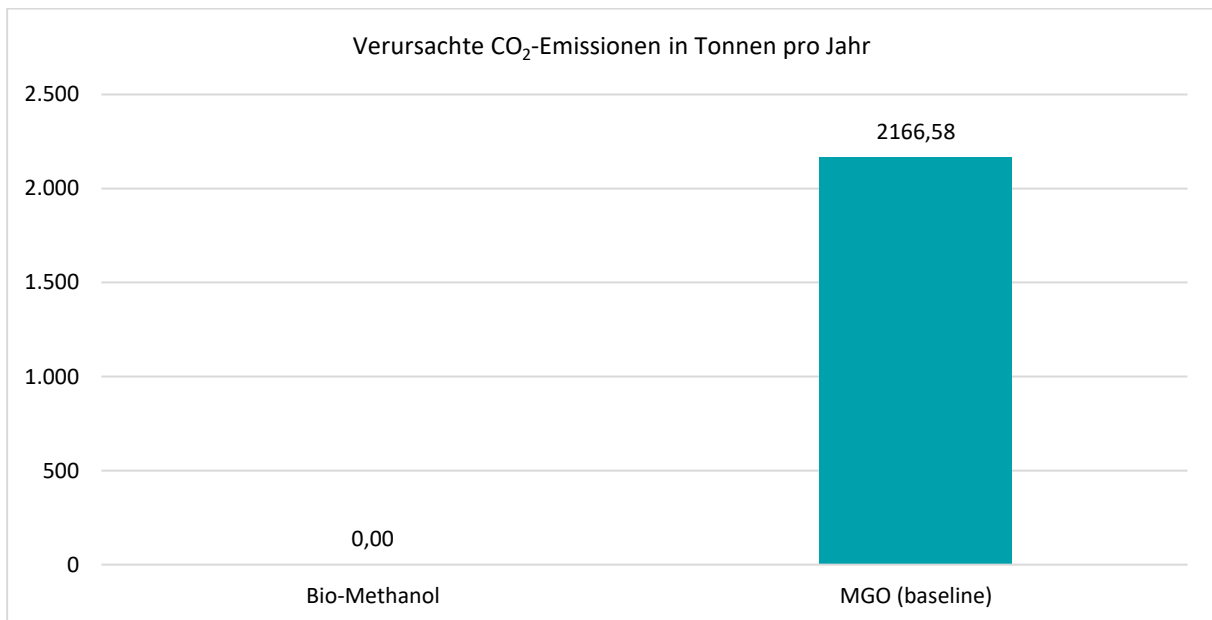


Abbildung 10: Verursachte CO₂-Emissionen in Tonnen pro Jahr - Bio-Methanol

8. Konzept 3: Das Beste aus zwei Welten - Hybrid

8.1 Wirtschaftliche Machbarkeit

Im Folgendem wird die wirtschaftliche Machbarkeit verschiedener serieller Hybride betrachtet. Bei der seriellen Hybridisierung wird der Pumpjet über einen Elektromotor angetrieben. Dieser bezieht seine Energie durch eine Batterie, die über Landstrom und einen durch einen Dieselmotor angetriebenen Generator gespeist wird. Die Zusammensetzung der Energie, welche für den Betrieb genutzt wird, basiert schlussendlich auf dem Verhältnis der Nutzung von grünem CO₂-freiem Strom und MGO. Die Kapazität der Batterie soll in dieser Studie einen rein elektrischen Betrieb von drei Stunden gewährleisten können. Es wird geschätzt, dass diese Dimensionierung der Batterie durch die Möglichkeit der Zwischenlandung in den Ein- und Ausschiffungsprozessen einen Energiemix von ca. 60% grünem Strom und 40% MGO ermöglicht. Hier ist explizit die Annahme zu erwähnen, dass die Ladeinfrastruktur hierfür ausreichend dimensioniert werden muss und das Laden im operativen Betrieb zuverlässig durchgeführt wird.

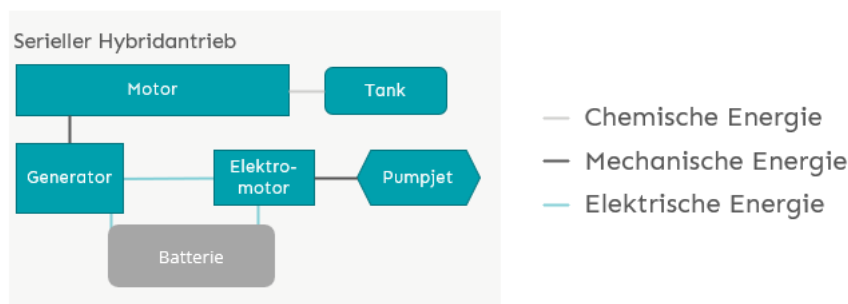


Abbildung 11: Aufbau eines seriellen Hybriden

In der folgenden Tabelle 10 sind die kalkulierten durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten exklusive des Personalaufwands für drei unterschiedliche Hybridisierungsgrade in ihre Fixkosten bei Anschaffung und ihre durchschnittlichen jährlichen variablen Kosten aufgeschlüsselt. Der Vergleich der drei verschiedenen Hybridisierungsgrade soll zum einen die Möglichkeit bieten, kostentechnisch eine Sensitivitätsanalyse vollziehen zu können, zum anderen sind die Varianten als eigenständige Betriebsalternativen bzw. Umsetzungsmöglichkeiten im operativen Betrieb zu sehen.

Die Fixkosten setzen sich aus den Anschaffungskosten für Motor, Tank und weitere Infrastruktur zusammen. Hier ist zu erwähnen, dass neben den Anschaffungskosten für die Batterien und die Elektromotoren auch die Anschaffungskosten für die Ladeinfrastruktur berücksichtigt wurden. Die Kosten für die Ladeinfrastruktur wurden auf rund 380.000 € geschätzt. Diese Schätzung

beruht auf öffentlichen Berichten und berücksichtigt Preissteigerungen sowie einem Multiplikator, der so auch die Ladestation abdeckt.⁸³. Es wurde davon ausgegangen, dass die bisher genutzten Dieselmotoren weiterhin im Generatorbetrieb verwendet werden können. Der variable Kostenanteil besteht aus den durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten exklusive des Treibstoffs und den durchschnittlichen jährlichen Treibstoffkosten. Erste beinhalten Reparatur, Wartung und sonstige Aufwendungen. Hier wurden die anfallenden Wartungs- und Reparaturkosten für das Gesamtsystem, also für die Elektromotoren, die Dieselmotoren und die Batteriespeicher berücksichtigt. Für die Abschreibung der Initialinvestition wurde ein Zeitraum von 25 Jahren angenommen. Alle in Kapitel 4.4 getätigten Annahmen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit gelten ebenfalls für diese Betrachtung.

⁸³ „Trafohaus kostet 100 000 Euro - Kreis Germersheim“.

Tabelle 10: Berechnung der oberen und unteren Grenze der Gesamtkosten – Hybride (Strom/MGO)

Antriebstechnologie	Hybrid 40/60		Hybrid 60/40		Hybrid 80/20	
Fixkosten						
Anschaffungskosten Motor	148.003,20 €		148.003,20 €		148.003,20 €	
Anschaffungskosten Tanks und weitere Infrastruktur	700.578,38 €		700.578,38 €		700.578,38 €	
Summe Fixkosten	848.581,58 €		848.581,58 €		848.581,58 €	
Variable Kosten						
durchschnittliche jährliche Betriebskosten exklusive Treibstoff	156.645,79 €		156.645,79 €		156.645,79 €	
durchschnittliche jährliche Treibstoffkosten (Barwert)	58.184,09 €	78.527,19 €	50.445,33 €	80.959,97 €	42.706,57 €	83.392,76 €
Summe variable Kosten	214.829,88 €	235.172,98 €	207.091,12 €	237.605,76 €	199.352,37 €	240.038,55 €
Jährliche Kosten gesamt	248.773,15 €	269.116,24 €	241.034,39 €	271.549,03 €	233.295,63 €	273.981,81 €
vermiedene Tonnen CO ₂ pro Jahr	866,63 tCO ₂ /a		1299,95 tCO ₂ /a		1733,27 tCO ₂ /a	
€ pro vermiedener Tonne CO ₂	287,06 €/tCO ₂	310,53 €/tCO ₂	185,42 €/tCO ₂	208,89 €/tCO ₂	134,60 €/tCO ₂	158,07 €/tCO ₂

Der genutzte Strom wird in dieser Studie als CO₂-neutral betrachtet, da ausschließlich grüner Strom eingespeist werden soll. Die Kosten pro vermiedener Tonne CO₂ werden nach der Ermittlung der durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten unter Verwendung der vermiedenen CO₂-Masse berechnet. Hier zeigt sich, dass Hybridisierung unter den betrachteten Alternativen die kostengünstige darstellt, wenn das Verhältnis von grünem Strom zu MGO größer oder gleich 60% zu 40% ist. Die Fixkosten fallen verglichen mit den anderen Top 3 Konzepten relativ gesehen gering aus, da die bestehende Infrastruktur zwar

umgebaut werden muss, aber zu großen Teilen weitergenutzt werden kann. Es müssten lediglich die Elektromotoren und die Batterie, die elektrischen Generatoren sowie die gesamte Verschaltung neu beschafft werden. Zusätzlich ist die in dieser Variante benötigte Batterie verhältnismäßig klein, da der rein elektrische Betrieb nur für 3 Stunden gewährleistet werden muss. Dies senkt die Investitionskosten erheblich gegenüber dem rein elektrischen Betrieb, in welchem die Batterie annähernd auf einen gesamten Betriebstag ausgelegt werden müsste.

Es ist auffällig, dass mit steigendem Anteil von grünem Strom aus erneuerbaren Energien am Gesamtenergiemix die Kosten pro vermiedener Tonne CO₂ stark fallen. Dies lässt die Handlungsempfehlung zu, während des Betriebs der Fähre, wann immer es möglich ist, den Batteriespeicher über eine Landstromversorgung zu laden. In einer Detailstudie muss geprüft werden, in welchem Verhältnis die Kosten der benötigten Gesamtinfrastruktur zur möglichen Ladeleistung stehen, um exakte Aussagen über den kostenoptimalen Betrieb treffen zu können.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezieht des Weiteren keine Förderungen mit ein. Prinzipiell existieren Förderungen für die nachhaltige Modernisierung von Binnenschiffen. Ob dieses Konzept alle Voraussetzungen für eine Förderung erfüllt, ist zu prüfen.

8.2 Politische und öffentliche Machbarkeit

Die Zusammensetzung von Stake- und Shareholdern der Varianten unterscheidet sich mit Ausnahme von den für den Bau und die Wartung möglichen zuständigen Akteuren zwischen den Varianten nicht.

Die Stake- und Shareholder der Rheinfähre stammen hauptsächlich aus den umliegenden Kommunen und der Wirtschaft. Alle wesentlichen Beteiligten müssen so weit wie möglich in den Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden, um die Machbarkeit der Emissionsreduktion umfassend zu überprüfen. Lokale Share- und Stakeholder sind zum Beispiel alle BürgerInnen, die die Fähre privat oder gewerblich nutzen, die beteiligten Kommunen Linz am Rhein und Remagen, der Fährbetreiber – also die Rheinfähre Linz-Kripp GmbH – sowie viele weitere. Mit allen oben genannten Parteien wurde im Rahmen des Projekts Smarte Region Linz in angemessener Art und Weise kommuniziert, um so eine bedarfs- und bedürfnisgerechte Analyse sicherzustellen.

Hybride Konzepte bilden einen zentralen Baustein der globalen Energiewende und sind damit ein wichtiger Faktor zur Bekämpfung des menschengemachten Klimawandels. Das hybride Konzept wird mittlerweile nicht nur in Kraftfahrzeugen, sondern auch in Schiffen immer relevanter. Da hybride PKW in der Vergangenheit oftmals staatlich gefördert wurden, ist es denkbar, dass eine Fähre dafür auch in Betracht kommt, denn die Schifffahrt ist für 3% des weltweiten

Kohlenstoffdioxidausstoßes verantwortlich. Trotzdem muss erwähnt werden, dass wahrscheinlich nur der Kurzstreckenschiffsverkehr, der nur einen Anteil der weltweiten Schifffahrt ausmacht, wirklich in Betracht für Hybridisierungen kommt. Relevant ist hier die Möglichkeit regelmäßiger kurzer Ladungszyklen, um so die verwendeten Batterien so klein wie möglich halten zu können.

Mittlerweile setzen einige Fährbetreiber hybride Fähren erfolgreich ein und rüsten den Rest der vorhandenen Flotte nach und nach um. Vor allem in skandinavischen Ländern sind einige Vorreiter zu finden.

8.3 Organisatorische Machbarkeit

Bei einem Umbau auf den hybriden Betrieb können große Teile der bisher verwendeten Komponenten mit hoher Wahrscheinlichkeit weiterverwendet werden. Hierzu zählen insbesondere die Motoren und die Tanks. Allerdings muss die räumliche Anordnung dieser Teile des Antriebsstrangs verändert werden. Konkret bedeutet dies, dass bei einem Umbau an den jetzigen Plätzen der Dieselmotoren Elektromotoren platziert werden müssen. Diese sollen die Pumpjets über eine Welle mit dem benötigten Drehmoment versorgen. Die neu zu beschaffenden Elektromotoren müssen über ein geeignetes elektrisches Kabelsystem mit dem ebenfalls neu zu beschaffenden Batteriespeicher verbunden sein. Die bisherigen Dieselmotoren sollen im generatorischen Betrieb den Batteriespeicher bei Bedarf speisen. Die notwendigen Umbaumaßnahmen hierfür werden als moderat zeitaufwändig und komplex eingeschätzt.

Des Weiteren ist zu klären, wie die benötigte Ladeinfrastruktur zum externen Laden der Batterien zu gestalten ist. Es wird ein Stromanschluss mit hoher Ladeleistung benötigt, um die Batterien in den kurzen Ladezyklen mit ausreichend Strom für die Überfahrt zu versorgen. Im Wesentlichen kann dies mit zwei Möglichkeiten realisiert werden. Zum einen ist es theoretisch möglich, die Fähre physisch an einen Kontakt zu manövrieren oder per Menschenkraft anzuschließen. Diese Methode wird als ungeeignet eingeschätzt, da ein hohes Maß an Verschleiß stattfindet und durch Wellengang, Fließgeschwindigkeit des Rheins und allgemeinen Bewegungen ein dauerhafter Kontakt nicht gewährleistet werden kann. Außerdem würde diese Anschlussmethode einen nicht unerheblichen Anteil der theoretisch möglichen Ladezeit in Anspruch nehmen. Um das kurze Zeitfenster des Ein- und Ausschiffungsprozesses optimal nutzen zu können, hat beispielsweise die Firma Wärtsilä⁸⁴ ein System entwickelt, welches automatische kontaktloses Laden ermöglicht und somit die Effizienz des Ladeprozesses erheblich steigert. Dieses System ist bis zu einer Ladeleistung von

⁸⁴ „Home - Wärtsilä in Deutschland“.

2 MW skalierbar.⁸⁵ Bei einer Ladeleistung dieser Höhe bleibt zu prüfen, ob es sogar möglich ist, die Fähre im reinen Batteriebetrieb zu bedienen. Das automatisierte Laden durch einen Roboterarm macht eine umfangreiche Umschulung des Personals wahrscheinlich überflüssig, es müsste lediglich eine Sicherheitsweisung durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit von Wartungskapazitäten, d.h. ausgebildeten Fachkräften wird zudem als hoch eingeschätzt, da im Vergleich zu Methanolantrieben hybride Antriebe etabliert sind.

8.4 Ressourcenbezogene Machbarkeit

Bei der Analyse der ressourcenbezogenen Machbarkeit gilt es zu prüfen, wie der benötigte Strom und das benötigte MGO bezogen werden können, welche speziellen Charakteristiken im Umgang bei der Verwendung dieses Treibstoffs beachtet werden müssen und wie die konkrete Handhabung an Bord ausfallen könnte. Hierbei ist zu beachten, dass die vorgeschlagenen Möglichkeiten auf Basis des aktuellen Kenntnisstands bezogen auf die bauliche Geometrie und Statik der Schiffe keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben und lediglich als grundsätzliche Umsetzungsblaupause zu verstehen sind. Abschließend wird die Berechnung der potenziellen Emissionsminderung im Vergleich zur aktuellen Situation erläutert.

Hybridisierung bildet eine von vielen Alternativen, die das Ziel haben, die Schifffahrtsbranche emissionsärmer zu gestalten. Durch die geringe volumetrische und gravimetrische Energiedichte der Batterie wird diese auf 3 Stunden Betriebszeit ausgelegt, um das Gesamtgewicht der Fähre trotz der schweren Batterien nicht zu stark zu erhöhen. Es wird davon ausgegangen, dass eine Speichergröße, die 3 Stunden vollelektrischen Durchschnittsbetrieb ermöglicht, einen ausreichend großen Puffer für einen reibungsfreien Betriebsablauf bildet. Die hier zugrundeliegende Annahme sind die zwischenzeitlichen Ladezyklen während des Ein- und Ausschiffungsprozesses. Das MGO-Tanksystem ist von der Hybridisierung ebenfalls betroffen. Um dieselben Tankzyklen wie vor dem Umbau zu erreichen, wird der MGO-Bedarf je nach Hybridisierungsgrad deutlich geringer ausfallen als der bisher. Es ist zu prüfen, ob sich eine Verlängerung der Tankzyklen oder eine geringere Betankungsmenge bei gleichen Zyklen als wirtschaftlich, organisatorisch und technisch sinnvoller herausstellt.

In der nachfolgenden Grafik sind die theoretisch zur Verfügung stehenden Freiräume, in denen die Batterien potenziell untergebracht werden könnten, eingezeichnet. Da bei dieser Variante als Treibstoff nach wie vor MGO neben dem Strom verwendet kann, ändert sich an der Bunkerung des flüssigen Treibstoffs wenig. Auflagen, Normen und Anforderungen für den Betrieb von

⁸⁵ „Charging – Marine Vessel Charging Systems“.

Batteriespeichern im maritimen Sektor sind in einer Detailstudie herauszuarbeiten. Es wird davon ausgegangen, dass die Beschaffung des Grünstroms den Fährbetreiber vor keine erheblichen Probleme stellen wird.

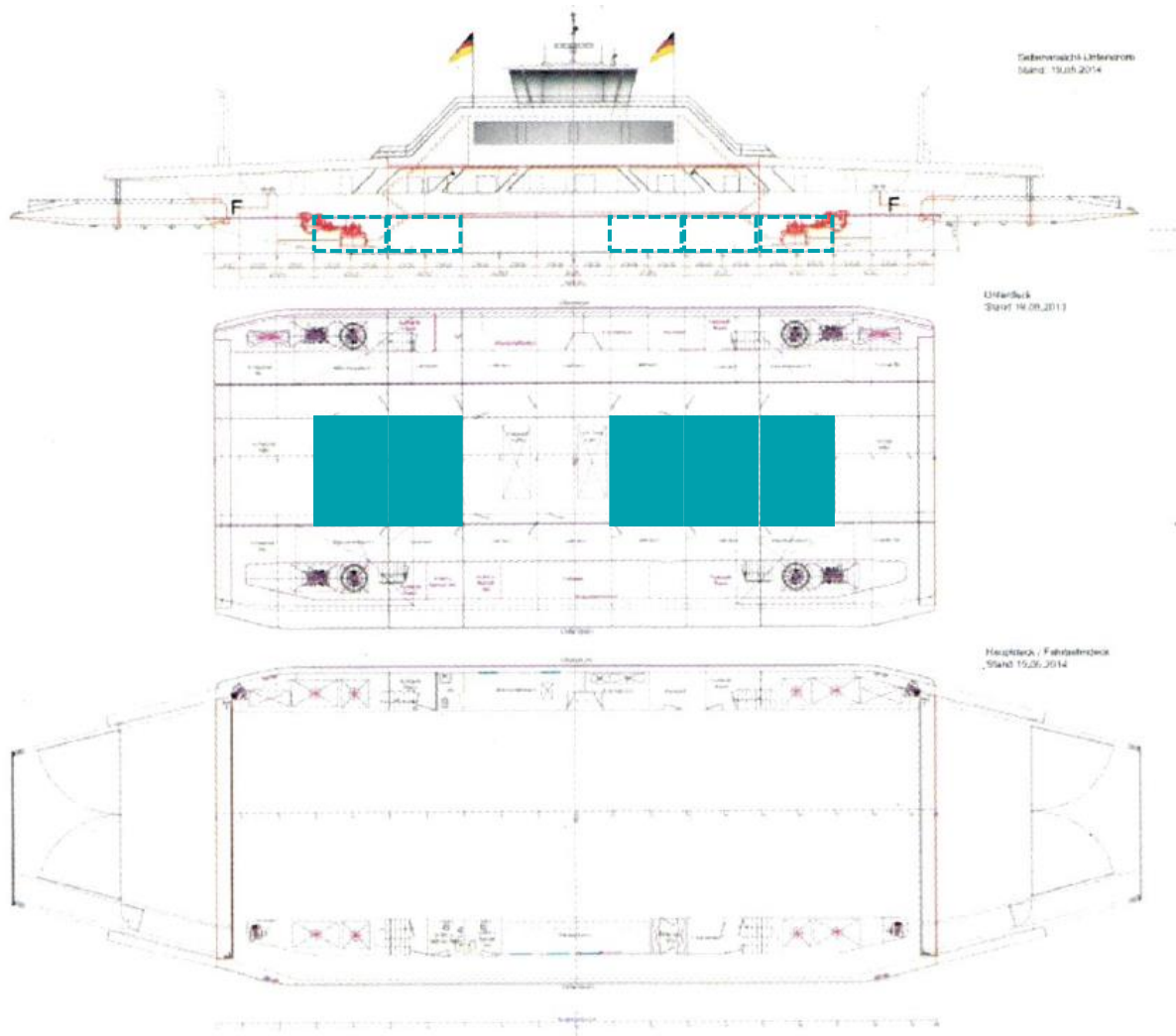


Abbildung 12: Darstellung der Freiräume auf der Fähre Linz-Remagen

Die mögliche Emissionsreduktion wurde auf Basis der vom Fährbetreiber bereitgestellten Daten berechnet. Hier wurde mithilfe der aktuellen Betankungszyklen approximiert, wie hoch der tatsächliche Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrades der Schiffe ist. Wissenschaftlichen Arbeiten wurden Durchschnittsemissionswerte für MGO bezogen auf Kohlenstoffdioxid entnommen. Unter Berücksichtigung der volumetrischen Energiedichte von MGO konnte aus diesen Werten ermittelt werden, dass die jährliche Kohlenstoffdioxidemission der Fähre bei approximativ 2166,58 t liegt. Diese Berechnung zeigt das enorme Emissionsminderungspotential auf, den ein CO₂-ärmerer Antrieb in diesem Fall durch Hybridisierung mit sich bringt. In der folgenden Grafik sind die CO₂-Emissionen von der verschiedenen Hybriden

gegenüber den geschätzten CO₂-Emissionen durch den Betrieb mit MGO abgetragen.

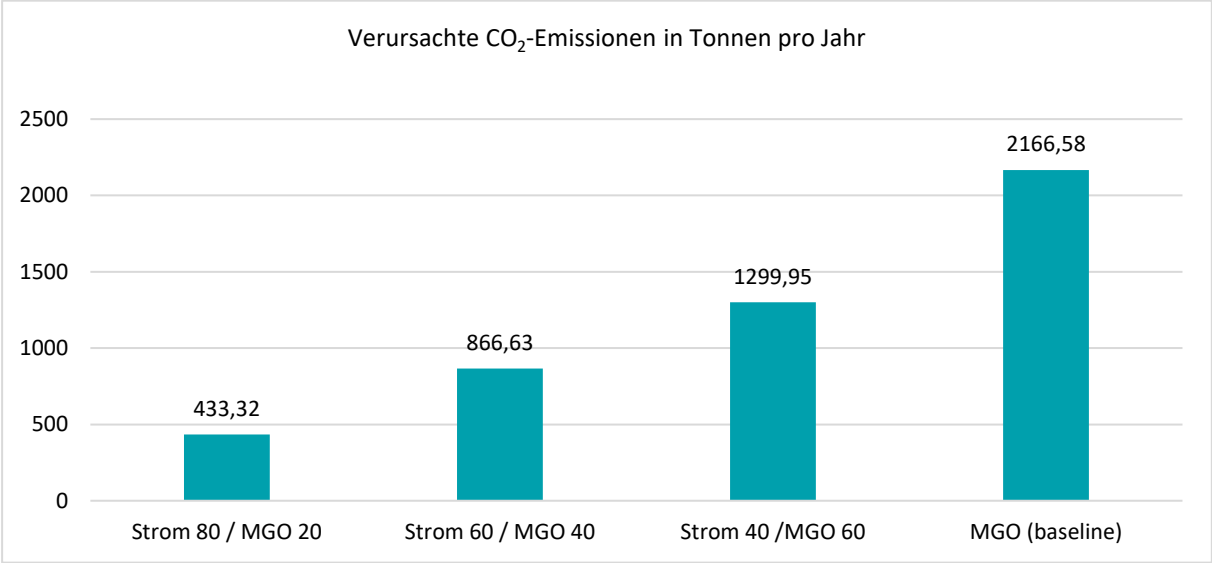


Abbildung 13: Verursachte CO₂-Emissionen in Tonnen pro Jahr - Hybride

9. Fazit und Handlungsempfehlung

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Vielzahl von Antriebstechnologien und Treibstoffen mit unterschiedlichen Emissionsminderungspotentialen, Etablierungsgraden und benötigten Umbaumaßnahmen untersucht. Aus den verschiedenen Möglichkeiten wurden durch einen mehrstufigen Prozess die Top 3 Varianten herausgearbeitet und tiefergehend untersucht. Zu den präferierten Konzepten zählen die Konzepte "Geringster Umrüstungsaufwand - Bio-Methanol", "Die Pionier-Lösung - Wasserstoff" und "Das Beste aus zwei Welten - Hybrid". Eine genaue Ausführung der Erkenntnisse aus den untersuchten Betrachtungsdimensionen der verschiedenen Varianten ist in den Kapiteln sechs bis acht zu finden.

Schiffe und Fähren sind jeweils Einzelkonstruktionen, welche für die Anforderungen und Wünsche des Eigners bzw. des Betreibers entsprechend ausgelegt werden. Jede der drei Varianten wird als grundsätzlich machbar eingestuft und reduziert die durch die Rheinfähren verursachten Kohlenstoffdioxidemissionen erheblich, jedoch mit unterschiedlichem ressourcenbezogenem, organisatorischem und wirtschaftlichem Aufwand. Die Bewertung und Gewichtung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologien ist insbesondere von der operativen Erfahrung und der strategischen Ausrichtung des Fährbetreibers abhängig. Bevor eine Entscheidung über die endgültig zu verfolgende Strategie erfolgt, sollten die hier präferierten Alternativen in einem nächsten Schritt im Rahmen einer Detailstudie untersucht werden. Die Grundlage dieser Detailstudie wurde durch diese Machbarkeitsuntersuchung gegeben. Eine Detailstudie sollte sich explizit mit den ingenieurwissenschaftlichen und konstruktionsrelevanten Details des Schiffsbaus bzw. des Umbaus der Fähre auseinandersetzen, um so einen sicheren Umbau und Betrieb gewährleisten zu können. Darüber hinaus sind Investitionszyklen und die strategische Ausrichtung des Betreibers zu berücksichtigen. Dies lag nicht im Fokus der vorliegenden Studie.

Als zweiten Schwerpunkt der Studie wurden in einem iterativen partizipativen Prozess verschiedene Digitalisierungsmöglichkeiten erarbeitet, ebenfalls mit dem Ziel der Emissionsreduktion. Die hieraus abgeleiteten Konzepte der Teilmaßnahmen sollen dieses Ziel hauptsächlich durch Effizienzsteigerungen des operativen Betriebs erzielen. Sie sind in Kapitel 5 zu finden. In der nächsten Phase des Projektes „Smarte Region Linz am Rhein“ sollten diese Teilmaßnahmen umgesetzt und ihre Wirksamkeit überprüft werden.

10. Anhang

10.1 Ergebnisse Befragungen



Abbildung 14: Bedarfe und Projektvorschläge aus der AkteurInnenbefragung

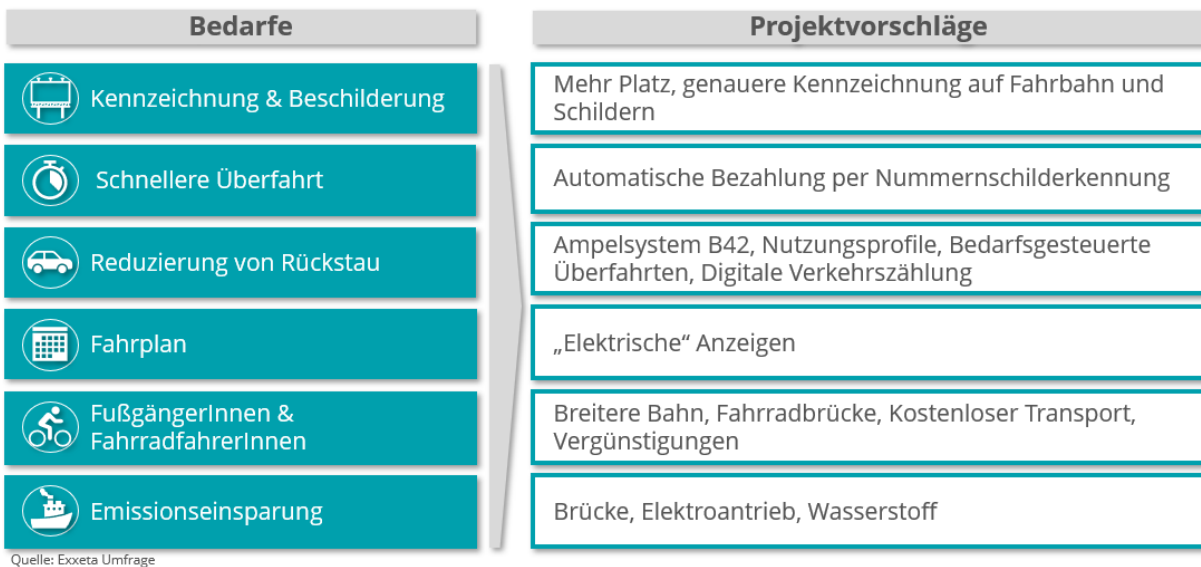


Abbildung 15: Bedarfe und Projektvorschläge aus der BürgerInnenbefragung

10.3 Ergebnisse Reallabor

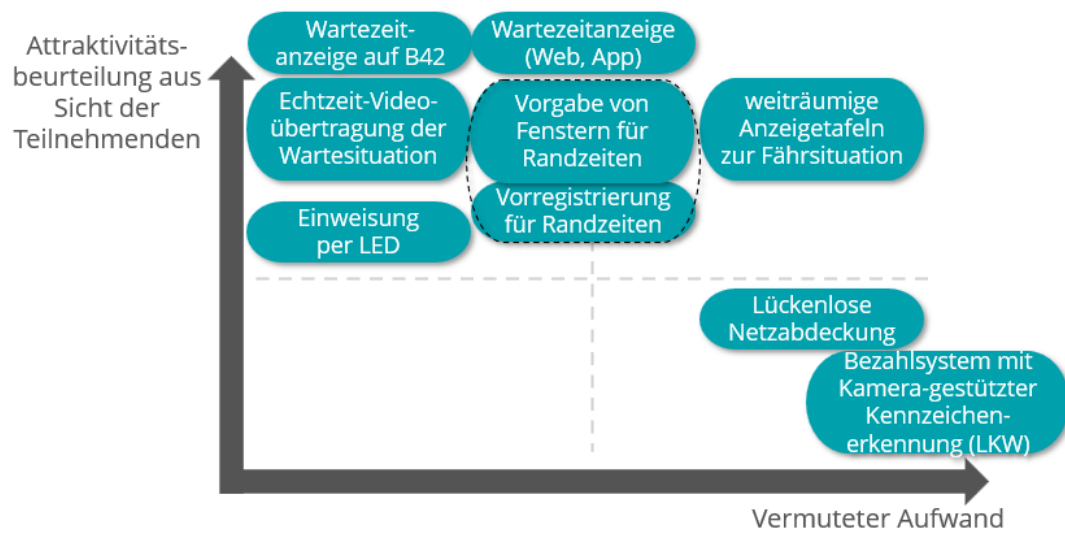
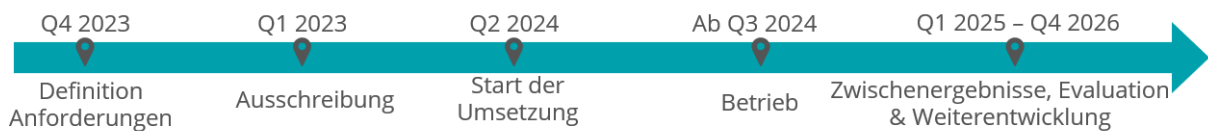


Abbildung 18: Reallabor - Einordnung potenzieller Digitalisierungsmaßnahmen

10.6 Wartezeitanzeige als Webanwendung / App

Priorität: Niedrig Hoch	Beschreibung	Ziele						
Adressierte Bedarfe	<ul style="list-style-type: none"> Erweiterung der bestehenden Webcams zu einem Live-Feed Darstellung der aktuellen Lage der Fähre in einer Web-Anwendung KundInnen können verbleibende Wartezeit einschätzen 	<ul style="list-style-type: none"> Einschätzung der verbleibenden Wartezeit Möglichkeit der einfachen Beurteilung der Situation von einem beliebigen Ort aus Nutzungserlebnis der Fähre auf verschiedenen Kanälen möglich 						
Zielgruppe	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektkosten</td> <td style="padding: 2px;">< 40.000 €</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektdauer</td> <td style="padding: 2px;">< 1 Jahr</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Betriebskosten</td> <td style="padding: 2px;">Offen/zu klären</td> </tr> </table>	Geschätzte Projektkosten	< 40.000 €	Geschätzte Projektdauer	< 1 Jahr	Geschätzte Betriebskosten	Offen/zu klären	
Geschätzte Projektkosten	< 40.000 €							
Geschätzte Projektdauer	< 1 Jahr							
Geschätzte Betriebskosten	Offen/zu klären							
<ul style="list-style-type: none"> Scheller und einfacher Zugang zu Informationen Transparenz der aktuellen Situation Ortsunabhängiger Zugriff 								
<ul style="list-style-type: none"> Rheinfähre Fährnutzende TouristInnen BürgerInnen 								




Stärken	Schwächen	Erfolgsmessung
<ul style="list-style-type: none"> Grundfunktionen einfach umzusetzen einfache Bedienbarkeit und Erreichbarkeit der Anwendung Als Ergänzung zu weiteren Maßnahmen nutzbar, keine oder nur geringfügige weitere Hardwareanschaffungen nötig 	<ul style="list-style-type: none"> Inhalte müssen zuverlässig verfügbar sein 	
Chancen	Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Nutzungszahlen der Web-Anwendung Wiederkehrende Nutzungen <u>NutzerInnenzufriedenheit</u> Reduktion der Schadstoff- und Lärmbelastung
<ul style="list-style-type: none"> Attraktivität der Fähre wird erhöht Webanwendung kann für weitere Services genutzt werden Einfacher Übertragbarkeit auf ähnliche (externe) Projekte 	<ul style="list-style-type: none"> Wirtschaftlicher Nutzen könnte gering sein Geringe Nutzung der Anwendung 	

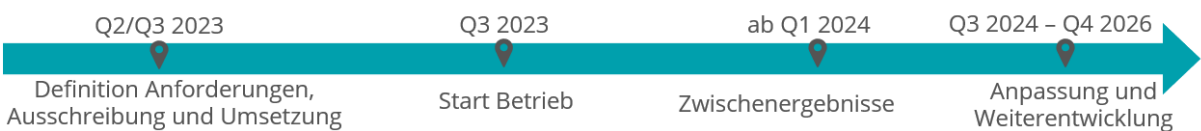
Umsetzungsplanung	Einsatzmöglichkeiten & Synergieeffekte
<ul style="list-style-type: none"> Konzeption: Anwendungsbereiche definieren, Software- und Individuallösungen recherchieren, Anforderungen festlegen Umsetzung: Anwendung entwickeln/umsetzen; Anwendung testen Pilotierung: Testphase starten, Einholen von Feedback der NutzerInnen Betrieb & Weiterentwicklung: Zwischenergebnisse bewerten, ggfs. Anpassungen vornehmen 	<ul style="list-style-type: none"> Nach Etablierung des Pilotprojekts Optimierung der Vorhersagegenauigkeit durch Messtechnik und Einbezug weiterer Parameter Durch einen Algorithmus können so die An- und <u>Ablegezeiten</u> prognostiziert werden Kombinierbar mit Online-Bezahlsystem Fläche nutzbar für Sonderinformationen & Werbung
Zeitliche Einordnung	
<input checked="" type="checkbox"/> Kurzfristig <input checked="" type="checkbox"/> Mittelfristig <input type="checkbox"/> Langfristig	

Verantwortliche für Umsetzung	Projektteam Smarte Region Linz; <u>WebentwicklerInnen</u> , Rheinfähre
--------------------------------------	--

Bildquelle: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/A1BVYjm4wJL.png>

10.7 Wartezeitanzeige auf der B42

Priorität: Niedrig Hoch	Beschreibung	Ziele						
Adressierte Bedarfe	<ul style="list-style-type: none"> Anzeigetafeln, die den KundInnen auf der Wartespur ohne Einsicht auf den Rhein schnell und einfach darstellen sollen, auf welcher Seite sich die Fähre befindet gezielte Kommunikation mit Aufruf zum Abstellen des Motors Die Anzeigetafel soll bestenfalls über Solar mit Strom versorgt werden Mithilfe von Sensorik soll die Schadstoffbelastung gemessen und transparent gemacht werden 	<ul style="list-style-type: none"> Wartesituation auf der Linzer Rheinseite verbessern bessere Planbarkeit und Transparenz für die NutzerInnen der Fähre Wartende sollen motiviert werden den Motor abzuschalten, um Lärm und den Ausstoß schädlicher Abgase zu reduzieren 						
Zielgruppe	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektkosten</td> <td style="padding: 2px;">< 40.000 €</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektdauer</td> <td style="padding: 2px;">< 2 Jahre</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Betriebskosten</td> <td style="padding: 2px;">Offen / zu klären</td> </tr> </table>	Geschätzte Projektkosten	< 40.000 €	Geschätzte Projektdauer	< 2 Jahre	Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären	
Geschätzte Projektkosten	< 40.000 €							
Geschätzte Projektdauer	< 2 Jahre							
Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären							
<ul style="list-style-type: none"> Rheinfähre Fährnutzende BürgerInnen Kommunen TouristInnen 								



Stärken	<ul style="list-style-type: none"> Deutliche Verbesserungen der Wartesituation Reduzierung von Schadstoff- und Lärmbelastung durch abstellen des Motors 	Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> Mittlere Investitionskosten, keine direkten Mehreinnahmen Dauerhafte Stromversorgung muss gewährleistet sein 	Erfolgsmessung	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Häufigkeit extremer Wartezeiten Erhöhung der KundInnenzufriedenheit Reduktion der Schadstoff- und Lärmbelastung
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung der Attraktivität der Fährnutzung durch bessere Informationslage 	Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Akzeptanz bei den Nutzenden Auswirkungen können nicht gemessen werden (da Nutzende anderen Weg wählen und kein Feedback geben) 		

Umsetzungsplanung
<ul style="list-style-type: none"> Konzeption: Anwendungsbereiche definieren, Rechtliche Rahmenbedingungen klären, Anforderungen festlegen, Standorte der Anzeigetafeln wählen Umsetzung: Anzeigetafeln aufbauen, Anwendung testen Pilotierung: Testphase starten, Einholen von Feedback der NutzerInnen Betrieb & Weiterentwicklung: Zwischenergebnisse bewerten, ggfs. Anpassungen vornehmen


Einsatzmöglichkeiten & Synergieeffekte
<ul style="list-style-type: none"> Zähler, der anzeigt, wie viele Plätze aktuell noch auf der Fähre verfügbar sind Fläche für Sonderinformationen nutzbar Konkretisierung der Prognose durch weitere Sensoren

Zeitliche Einordnung
<input checked="" type="checkbox"/> Kurzfristig <input type="checkbox"/> Mittelfristig <input type="checkbox"/> Langfristig

Verantwortliche für Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> Projektteam Smarte Region Linz; VG und Stadt Linz; techn. Dienstleister; Rheinfähre
--------------------------------------	---

Bildquelle: https://www.pnp.de/lokales/stadt-und-landkreis-passau/passau-land/3076873_A-3-Infotafeln-sollen-Ausweichverkehr-eindaemmen.html

10.8 Echtzeit-Videoübertragung der Wartesituation


Priorität: Niedrig Hoch	Beschreibung	Ziele						
Adressierte Bedarfe	<ul style="list-style-type: none"> • Videoübertragung der nicht einsehbaren Fahrspur mit wartenden Fahrzeugen • Übertragung der Echtzeit-Videoaufnahmen auf Monitore beim Führer und im Aufenthaltsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrpersonal Transparenz über die Wartesituation vermitteln • Vermeidung von Umrangieren der Fahrzeuge • Auslastung und Taktung der Fähre erhöhen • Einsparung von Fahrten inkl. Emissionseinsparung in Randzeiten durch früheres Erkennen von „Nachzüglern“ 						
Zielgruppe	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #00728f; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektkosten</td> <td style="padding: 2px;"><40.000 €</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #00728f; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektdauer</td> <td style="padding: 2px;">< 1 Jahr</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #00728f; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Betriebskosten</td> <td style="padding: 2px;">In Prüfung</td> </tr> </table>	Geschätzte Projektkosten	<40.000 €	Geschätzte Projektdauer	< 1 Jahr	Geschätzte Betriebskosten	In Prüfung	
Geschätzte Projektkosten	<40.000 €							
Geschätzte Projektdauer	< 1 Jahr							
Geschätzte Betriebskosten	In Prüfung							
<ul style="list-style-type: none"> • Rheinfähre • Fährnutzende • BürgerInnen • Kommunen • TouristInnen 								

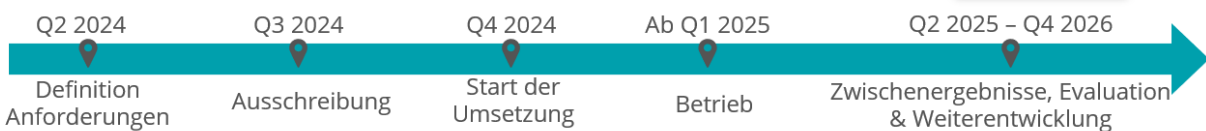
Q2/Q3 2023	Q3 2023	ab Q1 2024	Q3 2024 – Q4 2026
Definition Anforderungen, Ausschreibung und Umsetzung	Start Betrieb	Zwischenergebnisse	Anpassung und Weiterentwicklung
Stärken	Schwächen	Erfolgsmessung	
<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Mehrwerte für das Fahrpersonal • Beschleunigung des Einschiffungsprozesses durch leichteres Einweisen von schweren Fahrzeugen und Reduzierung der Fahrtzeit für Nutzende • Geringe Umsetzungskosten • Kurzfristige Umsetzbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Empfang des Videos muss störungsfrei gestaltet werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslastung der Fähre • Senkung des Kraftstoffverbrauchs • Dauer des Ein- und Ausschiffungsprozesses • Anzahl reduzierter Fahrten • Feedback der NutzerInnen 	
Chancen	Risiken		
<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Betriebskosten • Einsparung von Fährüberfahrten führt zur Reduktion von Emissionen • Kann für künftige Automatisierung genutzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Kann als Videoüberwachung wahrgenommen werden 		

Umsetzungsplanung	Einsatzmöglichkeiten & Synergieeffekte
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption: Anwendungsbereiche definieren, Rechtliche Rahmenbedingungen klären, Anforderungen festlegen, Standort der Kamera/s festlegen • Umsetzung: Kamera aufbauen, Anwendung testen • Pilotierung: Testphase starten, Einholen von Feedback der NutzerInnen • Betrieb & Weiterentwicklung: Zwischenergebnisse bewerten, ggfs. Anpassungen vornehmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion der Zeit, die für die Einschiffung benötigt wird, da eventuelles Umparken von schweren Fahrzeugen vermieden werden kann • Ausbaustufe: Ampelsystem mit automatisierter Anzeige zur Einweisung der Fahrzeuge • Video kann für weitere Teilmaßnahmen genutzt werden
Zeitliche Einordnung	
<input checked="" type="checkbox"/> Kurzfristig <input type="checkbox"/> Mittelfristig <input type="checkbox"/> Langfristig	
Verantwortliche für Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Projektteam Smarte Region Linz; VG und Stadt Linz; techn. Dienstleister; Rheinfähre

Bildquelle: <https://zeenews.india.com/india/srinagar-cctv-to-be-installed-outside-shops-business-establishments-2451591.html>.

10.10 Weiträumige Anzeigetafeln zur Fährsituation

Priorität: Niedrig Hoch	Beschreibung	Ziele						
Adressierte Bedarfe	<ul style="list-style-type: none"> Weiträumige verteilte Anzeigen an Zubringerstraßen Informationstafeln stellen die aktuellen Informationen über die Wartezeit und den Fährbetrieb dar 	<ul style="list-style-type: none"> Potenzielle KundInnen können frühzeitig entscheiden, ob die Nutzung für sie in Frage kommt Erhöhung der <u>KundInnenzufriedenheit</u> durch Transparenz Vermeidung von langem Rückstau 						
Zielgruppe	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white;">Geschätzte Projektkosten</td> <td>> 215.000 €</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white;">Geschätzte Projektdauer</td> <td>< 4 Jahre</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #008080; color: white;">Geschätzte Betriebskosten</td> <td>Offen / zu klären</td> </tr> </table>	Geschätzte Projektkosten	> 215.000 €	Geschätzte Projektdauer	< 4 Jahre	Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären	
Geschätzte Projektkosten	> 215.000 €							
Geschätzte Projektdauer	< 4 Jahre							
Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären							
<ul style="list-style-type: none"> BürgerInnen TouristInnen Rheinfähre 								



Stärken	Schwächen	Erfolgsmessung
<ul style="list-style-type: none"> Transparenz über Wartesituation Reduzierung der Emissionen und Wartezeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Startinvestitionen notwendig Einbindung vieler Stakeholder für ganzheitliches Verkehrsleitsystem Weiträumige, simultane Informationsübermittlung der Ist-Situation 	
Chancen	Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Häufigkeit extremer Wartezeiten Erhöhung der KundInnenzufriedenheit Reduktion der Schadstoff- und Lärmbelastung
<ul style="list-style-type: none"> Frühzeitiges Erkennen und Lösen von Problemzuständen Erhöhung der Bekanntheit und NutzerInnenzufriedenheit 	<ul style="list-style-type: none"> Bei ungünstiger Platzierung keine Wirkung Zusammenspiel von verschiedenen technischen Parametern sorgt für falsche Informationen 	

Umsetzungsplanung
<ul style="list-style-type: none"> Konzeption: Anwendungsbereiche definieren, rechtliche Rahmenbedingungen klären, Anforderungen festlegen, Standort der Anzeigetafeln wählen Umsetzung: Anzeigetafeln aufbauen; Leitsystem testen Pilotierung: Testphase starten, Einholen von Feedback der NutzerInnen Betrieb & Weiterentwicklung: Zwischenergebnisse bewerten, ggfs. Anpassungen vornehmen

Einsatzmöglichkeiten & Synergieeffekte
<ul style="list-style-type: none"> Integration von vorhandenen Informationen Ausbau der Anzahl der Tafeln bei Erfolg Frühzeitige Vermeidung von Rückstau erhöht die <u>KundInnenzufriedenheit</u> Nutzung der Daten anderer Teilmaßnahmen

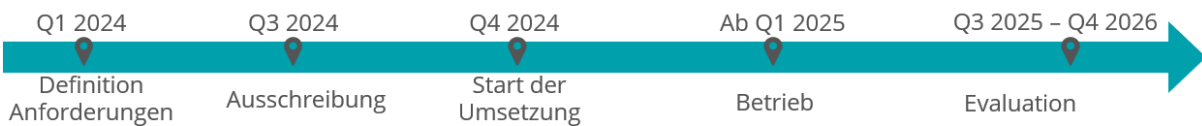
Zeitliche Einordnung
<input type="checkbox"/> Kurzfristig <input checked="" type="checkbox"/> Mittelfristig <input checked="" type="checkbox"/> Langfristig

Verantwortliche für Umsetzung	Projektteam Smarte Region Linz; VG und Stadt Linz; LBM, EntwicklerInnen, Rheinfähre
--------------------------------------	---

Bildquelle: <https://www.stadtwerke-karlsruhe.de/de/presse/meldungen/2019/20191119.php>

10.11 Lückenlose Netzabdeckung


Priorität: Niedrig Hoch		Beschreibung <ul style="list-style-type: none"> Durch ein Funkloch auf dem Rhein sind KundInnen auf mobilen Endgeräten betroffen (die Geräte der Fähre sind bereits mit eigenem WLAN verbunden) Bereitstellung einer Technologie, um Bandbreite zu sichern 	Ziele <ul style="list-style-type: none"> Dauerhafte Internetanbindung Erhöhung der <u>KundInnenzufriedenheit</u> 						
Adressierte Bedarfe <ul style="list-style-type: none"> Funkloch über dem Rhein Erhöhung <u>KundInnenzufriedenheit</u> & effizienteres Kassieren 	<table border="1"> <tr> <td>Geschätzte Projektkosten</td> <td>< 40.000 €</td> </tr> <tr> <td>Geschätzte Projektdauer</td> <td>< 1 Jahr</td> </tr> <tr> <td>Geschätzte Betriebskosten</td> <td>Offen / zu klären</td> </tr> </table>	Geschätzte Projektkosten	< 40.000 €	Geschätzte Projektdauer	< 1 Jahr	Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären		
Geschätzte Projektkosten	< 40.000 €								
Geschätzte Projektdauer	< 1 Jahr								
Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären								
Zielgruppe <ul style="list-style-type: none"> KundInnen Rheinfähre 									

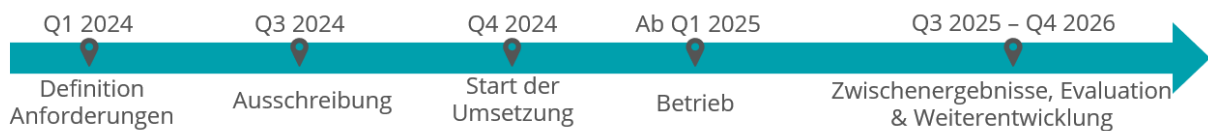


Stärken <ul style="list-style-type: none"> Nutzung simpler etablierter Technologien 	Schwächen <ul style="list-style-type: none"> Je nach Lösung mit hohen Investitionen verbunden Sehr kurze Phase des Funklochs 	Erfolgsmessung <ul style="list-style-type: none"> Messung der Netzabdeckung Messung der KundInnenzufriedenheit
Chancen <ul style="list-style-type: none"> Steigerung KundInnenzufriedenheit 	Risiken <ul style="list-style-type: none"> Netzwerksicherheit 	

Umsetzungsplanung <ul style="list-style-type: none"> Konzeption: Anwendungsbereiche definieren, Anforderungen festlegen Umsetzung: Anbringung der technischen Umsetzung Betrieb & Evaluation: Zwischenergebnisse bewerten, ggfs. Anpassungen vornehmen 	Einsatzmöglichkeiten & Synergieeffekte <ul style="list-style-type: none"> Ggf. <u>Kombination</u> mit allgemeinem WLAN-Ausbau (Maßnahme 7.1) Schaltung von Werbung bei WLAN-Anmeldung
Zeitliche Einordnung <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kurzfristig <input checked="" type="checkbox"/> Mittelfristig <input type="checkbox"/> Langfristig 	
Verantwortliche für Umsetzung <p>Projektteam Smarte Region Linz; Rheinfähre, Hardwarelieferant</p>	

10.12 Einweisungsunterstützung per LED

Priorität: Niedrig Hoch	Beschreibung	Ziele						
Adressierte Bedarfe	<ul style="list-style-type: none"> • Teilautomatisierung des Einschiffungsprozesses • Schaltbare Bodenleuchten auf Rampen und Fahrspuren auf der Fähre • Eindeutige Farbcodierung gibt vor, auf welche Spur das Fahrzeug fahren soll und wie weit es vorfahren soll 	<ul style="list-style-type: none"> • Erleichterung des Einschiffungsprozesses • Möglichkeit der zukünftigen Teilautomatisierung 						
Zielgruppe	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #00728f; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektkosten</td> <td style="padding: 2px;">< 215.000 €</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #00728f; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Projektdauer</td> <td style="padding: 2px;">< 2 Jahre</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #00728f; color: white; padding: 2px;">Geschätzte Betriebskosten</td> <td style="padding: 2px;">Offen / zu klären</td> </tr> </table>	Geschätzte Projektkosten	< 215.000 €	Geschätzte Projektdauer	< 2 Jahre	Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären	
Geschätzte Projektkosten	< 215.000 €							
Geschätzte Projektdauer	< 2 Jahre							
Geschätzte Betriebskosten	Offen / zu klären							
<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigung des Einschiffungsprozesses • Entlastung der MitarbeiterInnen insbesondere zu Stoßzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • KundInnen • Rheinfähre 							



Stärken	Schwächen	Erfolgsmessung
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung des Durchsatzes der Fähre, effizientere Prozesse • Verbessertes Kundenerlebnis 	<ul style="list-style-type: none"> • Fähre kann während der Installation nicht genutzt werden • Ggfs. hohe Anfangsinvestition und Wartungskosten 	
Chancen	Risiken	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung <u>NutzerInnenzahlen</u> • Anzahl der Überfahrten pro Tag • <u>KundInnenzufriedenheit</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Notwendige Hardware für Teilautomatisierung des Fährablaufes 	<ul style="list-style-type: none"> • Robustheit der Komponenten nicht gesichert 	

Umsetzungsplanung	Einsatzmöglichkeiten & Synergieeffekte
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption: Anwendungsbereiche definieren, rechtliche Rahmenbedingungen klären, Anforderungen festlegen, Standorte der Anzeigen wählen; Klärung ob Steuerung der Bodenleuchten über Webanwendung oder Applikation erfolgt • Umsetzung: Anzeigen/ Bodenleuchten auf-/einbauen; System testen • Pilotierung: Testphase starten, Einholen von Feedback der NutzerInnen • Betrieb & Weiterentwicklung: Zwischenergebnisse bewerten, ggfs. Anpassungen vornehmen; weitere Automatisierung prüfen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorerst gezielte Steuerung der einzelnen LEDs per Webanwendung oder Applikation • Durch Bodensensoren & Kamerasysteme automatische Steuerung der Einweisung möglich
Zeitliche Einordnung	
<input type="checkbox"/> Kurzfristig <input checked="" type="checkbox"/> Mittelfristig <input type="checkbox"/> Langfristig	

Verantwortliche für Umsetzung	Projektteam Smarte Region Linz; Rheinfähre, Hardwarelieferant
--------------------------------------	---

Bildquelle: https://www.archiproducts.com/de/produkte/simes/led-boden-orientierungsleuchte-aus-aluminium-strangpresst-fur-aussen-minilinear_318904

Glossar

Bezeichnung	Erläuterung
Bio-Kraftstoffe	Kraftstoffe, welche aus Biomasse erzeugt werden
Biogas	Gasförmiger Energieträger, welcher durch Vergärung biogener Rohstoffe entsteht – Gemisch aus Methan, Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und geringen Mengen weiterer Bestandteile
Bio-Diesel	Pflanzlicher Kraftstoff, meist auf Basis von Rapsöl
Blaue Kraftstoffe	Kraftstoffe fossilen Ursprungs, welche durch Abscheidung von CO ₂ im Produktionsprozess keine direkten Emissionen verursachen
Brennwert	Der Brennwert gibt die chemisch gebundene Energie einer bestimmten Menge eines Stoffes an
Bunkerung	Bezeichnung für die Lagerung von Brennstoffen in der Schifffahrt
CAPEX	Capital Expenditures – Investitionsausgaben
CCS	Carbon Capture and Storage – CO ₂ -Abscheidung mit anschließender Speicherung des CO ₂ .
CCU	Carbon Capture and Utilization, CO ₂ -Abscheidung mit anschließender Verwendung/ Verwertung des CO ₂
CNG	Compressed Natural Gas – Komprimiertes Erdgas
Dual Fuel Motoren	Motoren, welche mit zwei Kraftstoffen betrieben werden
EEG-Umlage	Umlage zur Finanzierung des Ausbaus erneuerbarer Energien
E-Fuels	Synthetische Kraftstoffe, welche mittels Wasser, Strom und Kohlenstoffdioxid hergestellt werden
Elektrolyse	Verfahren bei dem durch elektrische Energie eine chemische Reaktion erzwungen wird
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol, Standards zur Erstellung von Treibhausgasbilanzen
Graue, braune, schwarze Kraftstoffe	Kraftstoffe aus fossilen Ressourcen wie z.B. Erdgas, Braunkohle oder Steinkohle
Grüne synthetische Kraftstoffe	Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien, die als emissionsfrei gewertet werden

Haber-Bosch-Prozess	Nach den Erfindern benanntes, großindustrielles chemisches Verfahren zur Herstellung von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff
Heizwert	Gibt an, welche Energie bei einer vollständigen Verbrennung einer bestimmten Menge freigesetzt wird
HFO	Heavy Fuel Oil (Schweröl), ist der aktuell am weitesten verbreiteter Schifffahrtsbrennstoff
IGC-Codes	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk – Internationaler Konstruktionsstandard für Transportschiffe von LNG
IGF-Codes	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels – Internationaler Sicherheitsstandard für Schiffe, die mit Gas oder leicht entzündlichen Kraftstoffen betrieben werden
IMO OSV Chemical Code	Richtlinien für den Transport und die Handhabung von gefährlichen und schädlichen flüssigen Stoffen auf Schiffen
Kryogene Luftzerlegung	Verfahren zur Trennung der Bestandteile der Luft mittels extrem niedriger Temperaturen und verschiedenen Druckniveaus
LNG	Liquefied Natural Gas – verflüssigtes Erdgas
LPG	Liquefied Petroleum Gas – flüssiges Autogas
Merit-Order	Marktmechanismus zur Strompreisbestimmung durch Anordnung der Kraftwerke nach Grenzkosten
MGO	Marine Gas Oil – Marine Gasöl, ist der aktuell genutzte Treibstoff der Linzer Fähren
PEM-Brennstoffzelle	Brennstoffzellentyp mit einer festen Polymermembran als Elektrolyt
Power-to-X	Sammelbegriff bzw. Kategorie von Technologien für die Speicherung und Umwandlung von erneuerbarem Strom - insbesondere bei Überschuss an erneuerbaren Energien
Primärenergieträger	Bezeichnung der Ursprünglichen Energiequelle also des Brennstoffs oder sonstigen Trägers aus dem die Energie umgewandelt und nutzbar gemacht wird

Reallabor	Zweites Beteiligungsformat für BürgerInnen der Region Linz, um Ideen weiterzuentwickeln und zu verfeinern
Scope 2	Bezeichnet den Betrachtungsrahmen für Emissionen zu dem die indirekten Treibhausgas-Emissionen aus eingekaufter Energie, wie Strom, Wasserdampf und Wärme zählen, die außerhalb der direkten Systemgrenze erzeugt werden
Scope 3	Bezeichnet den Betrachtungsrahmen für Emissionen zu dem die indirekten Treibhausgas-Emissionen aus der vor- und nachgelagerten gelagerten Wertschöpfungskette, wie Transport und Lieferung sowie Abfallentsorgung zählen, die außerhalb der direkten Systemgrenze erzeugt werden.
SOLAS-Bestimmungen	Regelt Grundsätze und Vorschriften zum Schutz der Menschen auf See
Treibhausgasneutral	Die Summe an Klimarelevanten Gasen in der Atmosphäre steigt nicht weiter
Umesterung	Chemische Reaktion, bei der ein Ester in einen anderen überführt wird
WTW	Well-to-Wake – gewählter Betrachtungsansatz zur Bewertung der Emissionen, ausgehend von der Kraftstoffförderung bis zur Nutzung
ZukunftsWerkStadt	Erstes Beteiligungsformat für BürgerInnen der Region Linz, um Wünsche, Ideen und Vorstellungen einzubringen

Literaturverzeichnis

Ausfelder, Florian. *Perspective Europe 2030: technology options for CO₂- emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production.* DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2022.

Bahtić, Fatima. „Maersk Secures Fuel Supply for 1st Green Methanol-Fueled Ship“. *Offshore Energy* (blog), 19. August 2021. <https://www.offshore-energy.biz/maersk-secures-fuel-supply-for-1st-green-methanol-powered-ship/>.

„**batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf**“. Zugegriffen 9. August 2022. https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=deaa76b8_14.

Brinks, Hendrik W. „LPG as a Marine Fuel“, 2017, 32.

Cames, Martin, Nora Wissner, und Jürgen Sutter. „Ammonia as a marine fuel – risks and perspectives“, 2021.

Cappellen, Lucas van, Harry Croezen, und Frans Rooijers. „Feasibility study into blue hydrogen Technical, economic & sustainability analysis“, 2018.

Wartsila.com. „**Charging – Marine Vessel Charging Systems**“. Zugegriffen 9. November 2022. <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shore-power/charging>.

CO₂ Und CO – Nachhaltige Kohlenstoffquellen Für Die Kreislaufwirtschaft. Zugegriffen 9. August 2022. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-60649-0>.

Comer, Bryan. „Air Emissions and Water Pollution Discharges from Ships with Scrubbers“, o. J., 39.

„**Eizo: Trafohaus kostet 100 000 Euro - Kreis Germersheim**“. Zugegriffen 9. Dezember 2022. https://www.rheinpfalz.de/lokal/kreis-germersheim_artikel,-eizo-trafohaus-kostet-100-000-euro-_arid,1242179.html.

Gielen, Dolf, Greg Dolan, Seungwoo Kang, Francisco Boshell, Alain Goeppert, Surya G. Prakash, Igvor Landälv, und Paul Durrant. „Innovation Outlook: Renewable Methanol“, o. J., 124.

Habibic, Ajsa. „World’s 1st Large-Scale e-Methanol Project to Fuel Maersk’s Boxships“. *Offshore Energy* (blog), 2. März 2022. <https://www.offshore-energy.biz/worlds-1st-large-scale-e-methanol-project-to-fuel-maersks-boxships/>.

„**Herkunft und Entstehung von Flüssiggas – der DVFG informiert - Deutscher Verband Flüssiggas e.V.**“, o. J. <https://www.dvfg.de/die-besondere-energie/herkunft-und-entstehung/>.

Hermeling, Werner. *Handbuch für den LNG- und CNG-Praktiker: Liquefied Natural Gas in der Anwendung.* Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2020.

Germany. „Home - Wärtsilä in Deutschland“. Zugegriffen 9. November 2022. <https://www.wartsila.com/deu>.

Hornig, Pauline, und Michael Kalis. „Wasserstoff - Farbenlehre Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie“, 2020.

„Hydex - Wasserstoff-Index - Euro/kg - Marktdaten - energate messenger+“. Zugegriffen 6. November 2022. <https://www.energate-messenger.de/markt/gas-oel-und-wasserstoff/preisgruppe/211750/hydex-wasserstoff-index-euro-kg>.

Jurkovic, Martin, Tomas Kalina, Lubomir Jancosek, Robert Kadnar, Piotr Gorzelanczyk, und Karel Jerabek. „Proposal of Conversion the Tugboat Engines to Diesel – LNG Operation“. *Advances in Science and Technology. Research Journal* Vol. 13, Nr. no 4 (2019). <https://doi.org/10.12913/22998624/113424>.

Köhler, Jonathan, Daniela Kirsch, Achim Klukas, Sebastian Timmerberg, und Martin Kaltschmitt. „Teilstudie “Studie über die Marktreife von Erdgasmotoren in der Binnen- und Seeschifffahrt““. *Wissenschaftliche Beratung des BMVI, Fraunhofer Institute, Karlsruhe*, 2018.

Law, Li Chin, Beatrice Foscoli, Epaminondas Mastorakos, und Stephen Evans. „A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost“. *Energies* 14, Nr. 24 (Januar 2021): 8502. <https://doi.org/10.3390/en14248502>.

Lindstad, Elizabeth, Benjamin Lagemann, Agathe Rialland, Gunnar M. Gamlem, und Anders Valland. „Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels“. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 101 (1. Dezember 2021): 103075. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>.

Liu, Ming, Chen Li, Eng Kiong Koh, Zhiqian Ang, und Jasmine Siu Lee Lam. „Is Methanol a Future Marine Fuel for Shipping?“ *Journal of Physics: Conference Series* 1357 (Oktober 2019): 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1357/1/012014>.

„Lloyds-Register_2019_Fuel-production-cost-estimates-and-assumptions-report.pdf“. Zugegriffen 9. August 2022. https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Lloyds-Register_2019_Fuel-production-cost-estimates-and-assumptions-report.pdf.

Losada, Ana María Isidoro. „Wahrnehmung von WasserstoffTechnologien“, o. J., 25.

„Lower and Higher Heating Values of Fuels | Hydrogen Tools (h2tools.org)“, o. J. h2tools.org.

ECOreporter.de. „Maersk geht strategische Partnerschaften für grünes Methanol ein“. Zugegriffen 4. Oktober 2022. <https://www.ecoreporter.de/artikel/maersk-geht-weltweit-strategische-partnerschaften-ein-um-die-produktion-von-gr%C3%BCnem-methanol-bis-2025-zu-steigern/>.

Marine Safety Forum, und Oil Companies International Marine Forum, Hrsg. „The Carriage of Methanol in Bulk Onboard Offshore Vessels“, o. J., 50.

Ortega, Alejandro, Konstantinos Gkoumas, Anastasios Tsakalidis, und Ferenc Pekár. „Low-Emission Alternative Energy for Transport in the EU: State of Play of Research and Innovation“. *Energies* 14, Nr. 22 (Januar 2021): 7764. <https://doi.org/10.3390/en14227764>.

Plevrakis, Georgios, Sotirios Mamalis, Daniel Barcarolo, Maria Polakis, und Russ Barling. „Setting the course to low carbon shipping - view of the value chain“, 2021.

Shaghayegh Kazemi Esfeh, Nathalie Monnerie, Sophia Mascher, David Baumstark, Dr. Dorottya Kriechbaumer, Dr. Nicole Neumann, Jonas Eschmann, u. a. „Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte - Kurzstudie“, Mai 2022.

Shukla, Pravesh Chandra, Giacomo Belgiorno, Gabriele Di Blasio, und Avinash K Agarwal. *Alcohol as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines*. Singapore: Springer, 2021. <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=6623989>.

METHANOL INSTITUTE. „Techno Economic Assessment of Zero Carbon Fuels“. Zugegriffen 9. August 2022. <https://www.methanol.org/techno-economic-assessment-of-zero-carbon-fuels/>.

„Techno-Economic Assessment of Blue and Green Ammonia as Energy Carriers in a Low-Carbon Future | Elsevier Enhanced Reader“. Zugegriffen 9. August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115312>.

Völker, Thorsten. „Hybridantriebskonzepte auf Schiffen“. In *Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern*, herausgegeben von Detlef Schulz, 133–38. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-658-10958-5_21.

Voss, Liane. „Hydrogen as ship-fuel“, 2020.

Wahl, Jonas, und Josef Kallo. „Carbon Abatement Cost of Hydrogen Based Synthetic Fuels – A General Framework Exemplarily Applied to the Maritime Sector“. *International Journal of Hydrogen Energy* 47, Nr. 6 (19. Januar 2022): 3515–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.035>.

Wang, Miao, Mohd A. Khan, Imtinan Mohsin, Joshua Wicks, Alexander H. Ip, Kazi Z. Sumon, Cao-Thang Dinh, Edward H. Sargent, Ian D. Gates, und Md Golam Kibria. „Can Sustainable Ammonia Synthesis Pathways Compete with Fossil-Fuel Based Haber–Bosch Processes?†“. *Energy & Environmental Science* 14, Nr. 5 (2021): 2535–48. <https://doi.org/10.1039/D0EE03808C>.

Watter, Holger. *Regenerative Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35868-6>.

Modellprojekt Smarte Region Linz
Marktplatz 14 • 53545 Linz am Rhein
Tel. 015172420599 • smartcity@linz.de

Facebook: Smarte Region Linz • Instagram: smarte_region_linz



KFW