



# Alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien für Binnenschiffe.

Ein Überblick.

Eine Broschüre des Vereins für europäische  
Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e. V. (VBW)  
*Fachausschuss Binnenschiffe*

**AUTOREN KAPITEL 1 - 2:**

Friederike Dahlke-Wallat (DST)

Benjamin Friedhoff (DST)

Jens Ley (DST)



**AUTOREN KAPITEL 3 - 4:**

Wytze de Boer (MARIN)

Alex Grasman (MARIN)

Gerco Hagesteijn (MARIN)



*Version:*

*16. Mai 2022*



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ALTERNATIVE KRAFTSTOFFE UND ANTRIEBSTECHNOLOGIEN</b>	<b>6</b>
2.1	Kurzfristige Lösungen	6
2.1.1	Abgasnachbehandlung	7
2.1.2	Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) und Biokraftstoffe der neuesten Generationen	9
2.1.3	Batterien	11
2.1.4	LNG oder flüssiges Bio-Methan (LBM)	12
2.2	Mittelfristige Lösungen	15
2.2.1	Methanol	15
2.2.2	Wasserstoff	17
2.3	Langfristige Lösungen	19
2.3.1	Ammoniak	19
<b>3</b>	<b>DAS ESSF-INFORMATIONSPORTAL</b>	<b>22</b>
3.1	Hinweise zur Anwendung des ESSF-Portals	22
<b>4</b>	<b>BEISPIELANWENDUNG: MÖGLICHKEITEN ZUR SENKUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN UM 55 % ODER MEHR BEI EINEM SCHUBBOOT</b>	<b>26</b>
4.1	Ziel der Auslegung	27
4.2	Relevante Vorüberlegungen	27
4.3	Optionen für die Neumotorisierung	27
4.4	Auswahl der besten Konzepte	29
4.5	Bewertung der gewählten Konzepte	31

# 1 EINLEITUNG

Mit dem Pariser Übereinkommen vom Dezember 2015 verpflichten sich die Vertragsparteien der Vereinten Nationen sowie die Europäische Union zu einer Anstiegsbegrenzung der globalen Erderwärmung auf deutlich unter 2° (möglichst 1,5° Celsius) gegenüber dem Mittelwert der Jahre zwischen 1850 – 1900.

Die EU formulierte 2018 zudem eine strategische Vision für ein klimaneutrales Europa bis 2050. Diese wurde u. a. in der Mannheimer Erklärung vom 17. Oktober 2018 mit Bezug zur Binnenschifffahrt aufgenommen und konkretisiert. Es wird darin eine Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit der Binnenschifffahrt durch Reduktion von

- Treibhausgasen bis 2035 um 35% im Vergleich zu 2015,
- Schadstoffe bis 2035 um mindestens 35% gegenüber 2015,

sowie eine weitgehende Beseitigung von

- Treibhausgasen und sonstigen Schadstoffen bis 2050.

Darüber hinaus ist am 1. Januar 2020 die EU-Verordnung 2018/1628 über mobile Maschinen und Geräte für Motoren (NRMM-Verordnung) mit mehr als 300 kW in Kraft getreten, die gegenüber der ZKR-Richtlinie der Stufe II deutlich strengere Emissionsgrenzwerte für Schiffsneubauten fordert.

Auch wenn das Binnenschiff bereits jetzt im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern als umweltfreundlich gilt, steht das Binnenschifffahrtsgewerbe vor großen ökonomischen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Zur Einhaltung der bereits geltenden gesetzlichen Vorschriften sowie zur Erreichung der klimapolitischen Ziele werden alternative Kraftstoffe zum Diesel sowie innovative Antriebs- und Abgasnachbehandlungstechnologien benötigt (im Folgenden als Greening-Technologien bezeichnet).

Vor diesem Hintergrund gibt diese Broschüre einen kompakten Überblick über gegenwärtig verfügbare oder in der Entwicklung befindliche Greening-Technologien. Ähnlich wie in anderen Verkehrssektoren sind einige Technologien noch nicht vollumfänglich für die Binnenschifffahrt kommerziell erhältlich. Aus dem Grund werden die Technologien nach ihrer perspektivischen Verfügbarkeit (kurz, mittel- und langfristig) untergliedert. Eine umfassende technische und wirtschaftliche Bewertung der Greening-Technologien, die für die emissionsfreie Entwicklung der Binnenschifffahrt geeignet sind, wurde darüber hinaus durch die ZKR veröffentlicht. Neben einer Kurzdarstellung der Technologien wird zudem ein webbasiertes Portal vorgestellt, das umfangreiche Daten über die grundlegenden Eigenschaften der Komponenten alternativer Kraftstoffe und der zugehörigen Systeme zur Energiespeicherung und Energieumwandlung zusammenzustellen.

Zuletzt wird an einem Anwendungsbeispiel exemplarisch die technische Auslegung und Dimensionierung von alternativen Antriebskonzepten für zwei Schubboote aufgezeigt.

<sup>1</sup> [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_de)

<sup>2</sup> [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/dmannheim/Mannheimer\\_Erklaerung\\_de.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/dmannheim/Mannheimer_Erklaerung_de.pdf)

<sup>3</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R1628&from=ES>

<sup>4</sup> <https://www.ccr-zkr.org/12080000-de.html>

Auf Grund der derzeitigen Dynamik bei der Entwicklung von alternativen Antriebstechnologien im Rahmen von F&E bzw. JIP-Projekten, handelt es sich hier um eine kompakte Bestandsaufnahme ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Die von der europäischen Kommission vorgebrachten Nachhaltigkeitskriterien sowie die Ergebnisse der im Rahmen des delegierten Rechtsaktes zur Taxonomie-Verordnung 2020/851 laufenden und abgeschlossenen EU-Konsultationen bleiben hier unberücksichtigt.



## 2 ALTERNATIVE KRAFTSTOFFE UND ANTRIEBSTECHNOLOGIEN

Zunächst werden die wichtigsten alternativen Kraftstoffe und Antriebstechnologien für die Binnenschifffahrt unter kurzen technischen Erläuterungen zusammenfassend dargestellt. Um ihre Reihenfolge in dieser Broschüre festzulegen, wurden die folgenden Fragen gestellt:

- Ist der Kraftstoff / die Technologie marktreif und erprobt?
- Sind technische Regelwerke verfügbar?
- Gibt es Pilotprojekte oder erste fahrende Schiffe mit Ausnahmegenehmigung?
- Ist eine Infrastruktur vorhanden oder hat der Aufbau begonnen?

Umso weniger Fragen mit „Ja“ beantwortet werden können, umso schwieriger ist es, die Technologie sofort auf einem Binnenschiff umzusetzen.

Da sich die Preise für Kraftstoffe, Komponenten etc. schnell ändern können (insbesondere, weil andere Verkehrsträger die Entwicklung schneller vorantreiben als die Binnenschifffahrt), wird an dieser Stelle auf das ESSF-Portal in Kapitel 3 verwiesen. Dort finden sich ständig aktualisierte Daten.

### 2.1 Kurzfristige Lösungen

Bei den kurzfristig verfügbaren Technologien können alle gestellten Fragen mit „Ja“ beantwortet werden. Ein Binnenschiff könnte also sofort damit ausgerüstet werden. Da viele Alternativkonzepte noch nicht die Technologiereife wie der konventionelle Dieselantrieb haben, muss jedoch die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall betrachtet werden. Es werden folgenden kurzfristige alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien beschrieben:

1. Abgasnachbehandlungssysteme
2. Hydrotreated Vegetable Oil und Biokraftstoffe
3. Einsatz von Batterien zur elektrischen Energieversorgung
4. LNG und LBM

## 2.1.1 Abgasnachbehandlung

Die Emissionen von Binnenschiffen mit Verbrennungsmotoren enthalten mehrere Komponenten, die Grenzwerte erfüllen müssen. Um diese Grenzwerte zu erfüllen, werden verschiedene Abgasnachbehandlungstechnologien eingesetzt. Im Folgenden werden vier Technologien vorgestellt, die zur Einhaltung der Grenzwerte der Stufe V beitragen. Die betrachteten Emissionen sind Stickoxide (NOX) und Partikel (PM) sowie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Sie sind allesamt gesundheitsschädlich.

### Abgasrückführung (AGR)

Die NOX-Konzentration im Abgas eines Dieselmotors wird durch die Abgasrückführung (AGR) reduziert. Die NOX-Konzentration ist abhängig von der Erzeugungsrate von NOX, die mit steigender Temperatur exponentiell wächst. Um die Spitztemperatur und die Sauerstoffkonzentration zu reduzieren, wird ein Teil des Abgases in den Brennraum zurückgeführt. Dieser Effekt wird durch Kühlung des zurückgeführten Abgases verstärkt. Die Absenkung der Verbrennungstemperatur zur Reduzierung der NOX-Konzentration ist begrenzt, da die Bildung von Rußpartikeln bei niedrigeren Temperaturen begünstigt und die Motorleistung, bzw. die Effizienz, beeinträchtigt wird. Außerdem verbleibt ein Rest von HC und CO im Abgas.

### Diesel-Oxidationskatalysator (DOC)

Um die Rückstände von HC und CO zu ca. 90 % aus dem Abgas zu entfernen, wird ein Diesel-Oxidationskatalysator (DOC) eingesetzt. Mit der Nachbehandlungskomponente DOC werden die HC und das CO zu Wasser (H<sub>2</sub>O) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oxidiert. In Kombination mit der AGR wird das Abgas für weitere Nachbehandlungen wie SCR und DPF beeinflusst. Die Prozessbedingungen im DOC sind nicht geeignet, die NOX-Konzentration durch Reduktion abzubauen.

### Dieselpartikelfilter (DPF)

Ein Dieselpartikelfilter reduziert die Partikelmasse aus den Motorabgasen. Bei Motoren der Stufe V ist die Anzahl der Partikel, die den DPF verlassen, zusätzlich auf eine Anzahl von 10<sup>12</sup> Partikeln pro kWh begrenzt. Die Größe der gezählten Partikel ist größer als 23 nm. Die Abscheidung der Partikel aus dem Abgas erfolgt durch das Durchströmen eines porösen Materials. Die abgeschiedenen Partikel reduzieren den Durchfluss durch den DPF und verändern die Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausströmung des DPF. Bei einer maximalen Druckdifferenz müssen die abgeschiedenen Partikel durch Filterregeneration oder einen Filterwechsel entfernt werden. Während der Filterregeneration werden die gesammelten Partikel, hauptsächlich Ruß, verbrannt, um den Filter zu reinigen. Danach werden die verstopfenden Partikel entfernt, die Druckdifferenz wird verändert und der Betriebszustand des DPF normalisiert. Der Ascherückstand nimmt mit jeder Filterregeneration zu. Die Zunahme der Asche ist viel langsamer als das Wachstum des Rußes und daher ist die Zeit viel länger, bis der Filter mit Asche verstopft ist. Wenn möglich, kann der Filter gereinigt werden oder er muss ausgetauscht werden. Um die Regeneration des Filters zu starten, wird eine höhere Temperatur benötigt. Dies kann durch eine Heizung oder einen Katalysator in Kombination mit dem Einspritzen von Kraftstoff in den Abgasstrom geschehen, um die Verbrennung des Rußes zu initiieren.

## Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Um die NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas zu reduzieren, kann eine selektive katalytische Reduktionstechnologie eingesetzt werden. Dem Abgas wird vor dem Eintritt in den Katalysator ein Reagenz zugeführt, das eine chemische Reaktion startet, um Stickoxide in zweiatomigen Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) umzuwandeln. Als Reagenz wird eine Harnstoff-Wasser-Lösung (zum Beispiel bekannt als AdBlue®) verwendet. Der Einsatz von Harnstoff erhöht die Betriebskosten. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen können je nach System und Konfiguration von 70 % bis zu mehr als 90 % reduziert werden.

## Kombination von Abgasnachbehandlungstechnologien

Die oben erläuterten Abgasnachbehandlungen müssen kombiniert werden, um die Abgasnorm der Stufe V (P ≥ 300 kW) zu erfüllen. Dies geschieht in der Regel in der folgenden Reihenfolge: AGR, DOC, DPF und SCR.

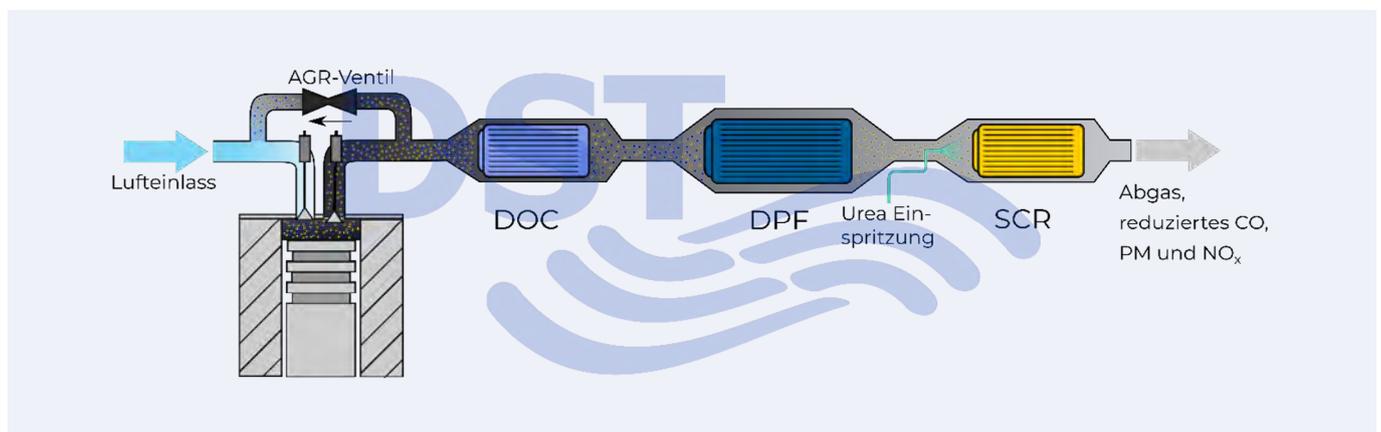


Abbildung 1 Komponenten eines Abgasnachbehandlungssystems

Aktuelle Entwicklungen zielen auf eine Kombination von DOC und DPF in einem Bauteil, welches dann deutlich kompakter gestaltet werden kann. Für die Nachrüstung sind Kombinationen aus DOC, DPF und SCR denkbar. Diese sind abhängig von der Emissionsnorm der eingebauten Hauptmaschine.

## Verweis auf relevante Regelwerke

- [Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe \(ES-TRIN\), Kapitel 9, Artikel 9.09 „Sonderbestimmungen für Abgasnachbehandlungssysteme“](#)

## Voraussetzungen für den Anwender

Bei älteren Hauptmotoren kann der Dieselpartikelfilter aufgrund des niedrigen Abgasgedrucks sehr viel Volumen beanspruchen. Beim SCR entstehen zusätzliche Betriebskosten für die Harnstoff-Wasser Lösung (z.B. AdBlue®).

## 2.1.2 Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) und Biokraftstoffe der neuesten Generationen

Drop-in-Kraftstoffe sind ein synthetischer und vollständig austauschbarer Ersatz für herkömmliche, aus Erdöl gewonnene Kohlenwasserstoffe (Benzin, Kerosin und Diesel). Es sind keine signifikanten Anpassungen des Motors oder des Kraftstoffsystems erforderlich.

### Technologiebeschreibung

Zu den synthetischen Kraftstoffen, die für die Binnenschifffahrt als wichtig angesehen werden, gehören GTL (Gas-to-Liquid) und HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). GTL wird mit der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt, einem allgemein als XTL (X to Liquid) bezeichneten Verfahren, das 1925 von Franz Fischer und Hans Tropsch entwickelt wurde. Das „X“ ist eine Variable und wird durch eine Abkürzung des ursprünglichen Energieträgers ersetzt, z. B. „G“ für Gas. Bei diesem Verfahren können aus Erdgas, anderen gasförmigen fossilen Brennstoffen oder Biomasse verschiedene flüssige synthetische Kraftstoffe wie GTL, Schmieröle und andere paraffinische Produkte für die chemische Industrie gewonnen werden. Wenn Biomasse als Ausgangsmaterial verwendet wird, ist auch der Begriff BTL (Biomass-to-Liquid) gebräuchlich. BTL kann vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden.

Fossile Dieselkraftstoffe enthalten zusätzlich zu Paraffinen auch erhebliche Mengen an Aromaten und Naphthenen, die eine saubere Verbrennung beeinträchtigen. HVO hingegen ist aromatenfrei und seine Zusammensetzung ist ähnlich wie die von GTL- und BTL-Dieselmotorkraftstoffen, die durch die Fischer-Tropsch-Synthese aus Erdgas und Biogas hergestellt werden. HVO ist nicht mit Biodiesel zu verwechseln, da dieser ein Fettsäuremethylester (FAME) ist und beim Einsatz als Kraftstoffersatz in einem konventionellen Motor Probleme bereiten kann. Daher ist die Erhöhung der FAME-Beimischung eine größere Herausforderung als bei HVO und wird durch die üblichen Testkraftstoffe nicht abgedeckt.

### Umweltvorteil

Das Ausgangsmaterial für HVO besteht aus erneuerbaren Quellen. Dies können pflanzliche und tierische Restfraktionen aus der Lebensmittelindustrie oder Rückstände aus der Pflanzenölverarbeitung sein. Lokal werden CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt, die vorher aber global von den nachwachsenden Rohstoffen aus der Luft entnommen wurden. Es werden Anstrengungen unternommen, die Entscheidung zwischen „Tank oder Teller“ zu beenden und wirklich nur Rohstoffe zu verwenden, die nicht in Konkurrenz zur Lebensmittelerzeugung stehen.

### Verweis auf relevante Regelwerke

HVO als Kraftstoff ist durch die Norm EN15940 zugelassen. Die Typzulassung nach der EU-Stufe V beinhaltet die Spezifikation des zugrunde gelegten Kraftstoffs. Allerdings sollten die Motorenhersteller bezüglich der Garantie, des Risikos des Verlusts der Typgenehmigung und der Empfehlungen für angepasste Schmiermittel kontaktiert werden. In vielen Fällen kann das Emissionsprofil durch Optimierung der Motorsteuerungsparameter verbessert werden.



# Schiffstechnik der Zukunft: Hybrid? Batterie? Brennstoffzelle?



### 2.1.3 Batterien

Batterien bieten die Möglichkeit, elektrische Energie zu speichern und werden in einem breiten Spektrum von Anwendungen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen eingesetzt. Daher gibt es eine Vielzahl von Batterietypen und die Entwicklungen gehen in verschiedene Richtungen. Batterien können durch folgende Faktoren charakterisiert werden: Leistungsdichte, Kapazität, Zyklenlebensdauer, Energiedichte, Kapitalkosten, Ladezeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit.

In der Abbildung ist das Funktionsprinzip einer Batterie auf der Basis einer Lithium-Ionen-Zelle zu sehen. Neben allen Varianten der verschiedenen Batterien haben sie alle in etwa den gleichen Aufbau. Eine Batteriezelle besteht aus zwei Elektroden, der negativen Anode und der positiven Kathode, die von einem Elektrolyten umschlossen sind. Der Elektrolyt kann aus flüssigen, gelartigen oder festen Materialien bestehen. Sowohl für die Elektroden als auch für den Elektrolyten werden unterschiedliche chemische Stoffe verwendet. Entladen einer Batterie bedeutet, chemische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Um eine Batterie zu laden, muss Strom fließen. Alle Reaktionen werden umgedreht. Allerdings ist die kontrollierte Umkehrung für die meisten Fälle nicht perfekt. Deshalb ist die Anzahl der Ladungen begrenzt.

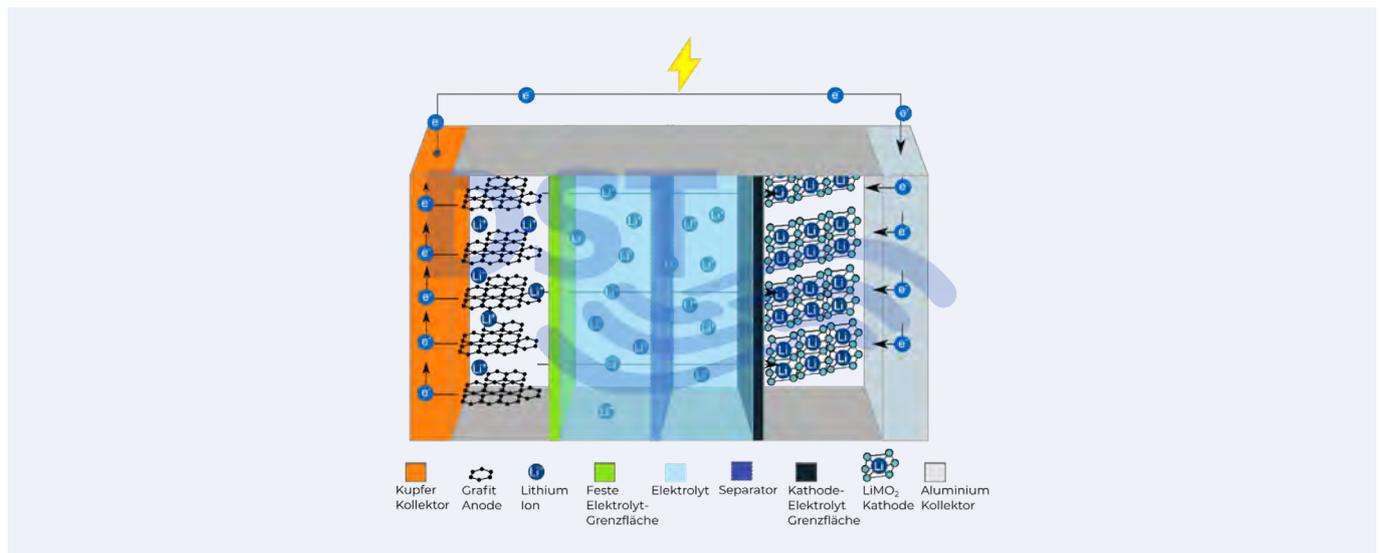


Abbildung 2 Aufbauskitze eines Lithium-Ionen-Akkus

#### Technologiebeschreibung

Maritime Batteriesysteme bestehen typischerweise aus mehreren tausend Zellen. Daher ist es wichtig, dass jede Zelle durchgängig mit allen anderen Zellen arbeitet. Die einzelnen Batteriezellen werden zu Batteriemodulen zusammengeschaltet, wodurch die erforderliche Spannung erreicht wird. Durch die Vernetzung dieser Einheiten können große Systeme mit einer hohen Kapazität aufgebaut werden. Der Vorteil ist, dass die Batteriesysteme entweder in den Schiffsrumpf integriert werden können oder in einem austauschbaren Containermodul an Bord kommen. Diese Lösung könnte besonders für Schiffe interessant sein, die ohnehin mit Containern arbeiten.

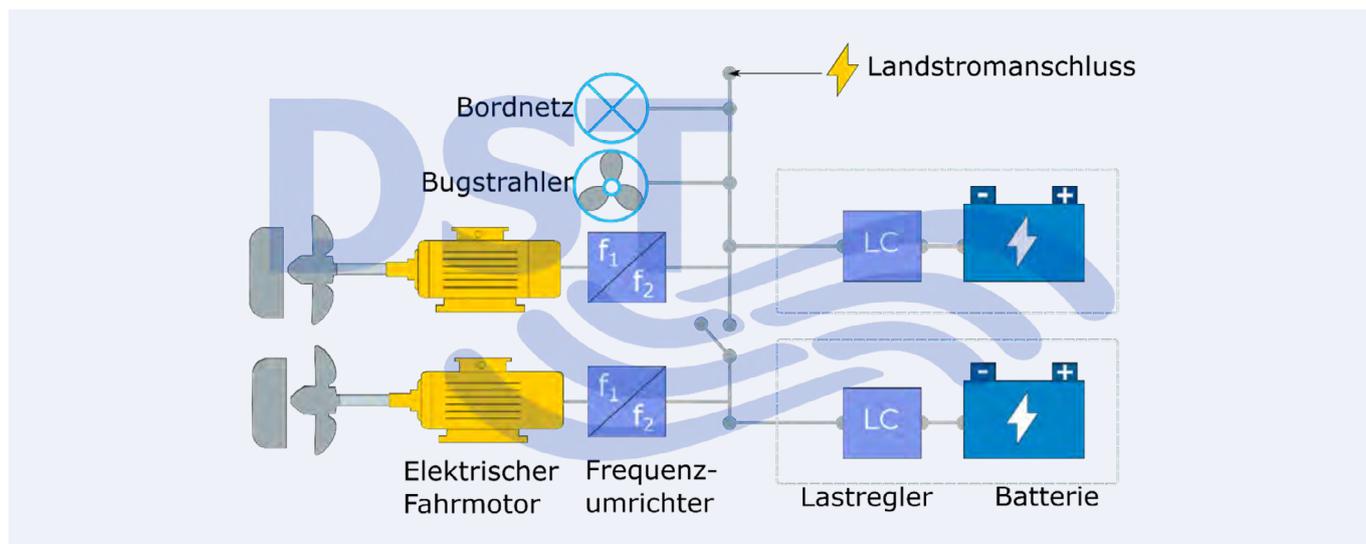


Abbildung 3 Beispiel für einen batterieelektrischen Antriebsstrang

### Umweltvorteil

Mit einem batterieelektrischen Antrieb ist ein lokal emissionsfreier Betrieb des Schiffes möglich. Stammt der Ladestrom der Batterien nicht aus einer regenerativen Quelle, bedeutet dies zunächst nur eine Verschiebung der Emissionen, wenn auch unter Umständen mit einem besseren Wirkungsgrad (Kraftwerk).

### Verweis auf relevante Regelwerke

- [Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe \(ES-TRIN\), Kapitel 10 und 11](#)

### Voraussetzungen für den Anwender

Damit das Batteriegewicht nicht zu groß wird, sollten der Energiebedarf des Schiffes moderat sein oder nicht zu lange Strecken mit reinem Batteriebetrieb eingeplant werden. Da die Investition in die Batterie groß sein kann, so dass die Abschreibungszeit die Lebensdauer überschreitet, kann das „pay-per-use“ Konzept eine gute Alternative sein. Hier zahlt der Binnenschiffer den verbrauchten Strom und eine Bereitstellungsgebühr für einen geladenen, auswechselbaren Batteriecontainer.

## 2.1.4 LNG oder flüssiges Bio-Methan (LBM)

LNG oder LBM als Kraftstoff ist eine technologisch bewährte und verfügbare Lösung. Er bietet insbesondere für Schiffe mit hohem Energiebedarf und Auslastungsgrad Vorteile, die von den geringeren Energiekosten profitieren. LNG und LBM bestehen hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ). Aufgrund seines möglichst geringen Kohlenstoffgehalts hat Methan bei der Verwendung als Kraftstoff ein Potenzial zur Reduzierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Da Methan jedoch ein sehr klimawirksames Gas ist, muss der Methanschlepp bei der Verwendung von LNG als Kraftstoff unter Kontrolle gehalten werden, um den Vorteil der niedrigen Emissionen bei der Verbrennung beizubehalten und die Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei der Verwendung von LNG sicherzustellen. LNG wird durch Abkühlung von Erdgas auf minus  $162\text{ °C}$  hergestellt, wodurch es in einen flüssigen Zustand überführt wird, um Lagerung und Transport zu erleichtern. Methan kann auch als Power-to-X-Kraftstoff hergestellt werden. Genau wie LBM kann es direkt als erneuerbare Substitution genutzt werden.

## Technologiebeschreibung

### Dual-Fuel-Motor (Diesel-Zyklus)

Im Dual-Fuel-Betrieb wird Erdgas in das Ansaugsystem des Motors eingespeist. Das Luft-Erdgas-Gemisch wird dann in den Zylinder gesaugt, genau wie bei einem Ottomotor, aber mit einem mageren Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Gegen Ende des Verdichtungsstaktes wird Dieselkraftstoff eingespritzt und entzündet das Erdgas. Ein Dual-Fuel-Motor kann mit reinem Dieselkraftstoff oder einem Gemisch aus Diesel und Erdgas betrieben werden und liefert die gleiche Leistungsdichte, Drehmomentkurve und das gleiche dynamische Verhalten wie der herkömmliche Dieselmotor.

### Reiner Gasmotor

Mono-Fuel-Gasmotoren arbeiten nach dem Otto-Prinzip und haben eine Fremdzündung. Sie haben auch eine etwas andere Charakteristik, die für Gas-elektrische Anwendungen in Aggregaten etwas besser geeignet ist als für Direktantriebe. Darüber hinaus ist die Regulierung des Methanschlupfes bei reinen Gasmotoren besser als bei Dual-Fuel Motoren.

Das LNG-Konzept kann entweder als Direktantrieb oder als Gas-elektrischer Antrieb (wie ein Diesel-elektrischer Antrieb) ausgeführt werden.

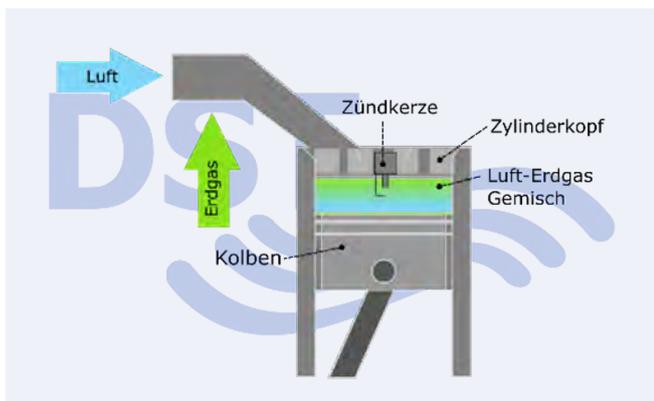


Abbildung 5 Reiner Gasmotor nach dem Ottoprinzip

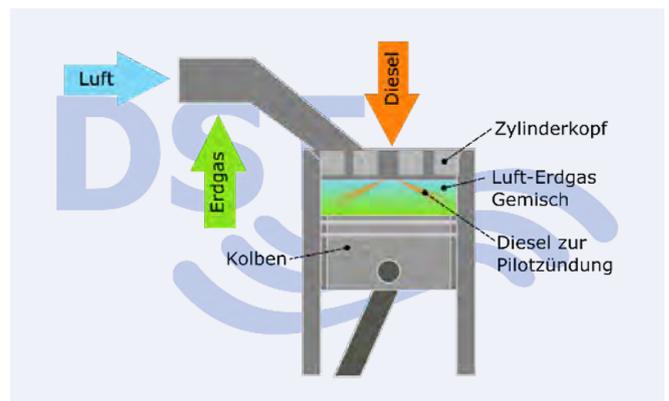


Abbildung 4 Dual-Fuel Motor nach dem Dieselprinzip

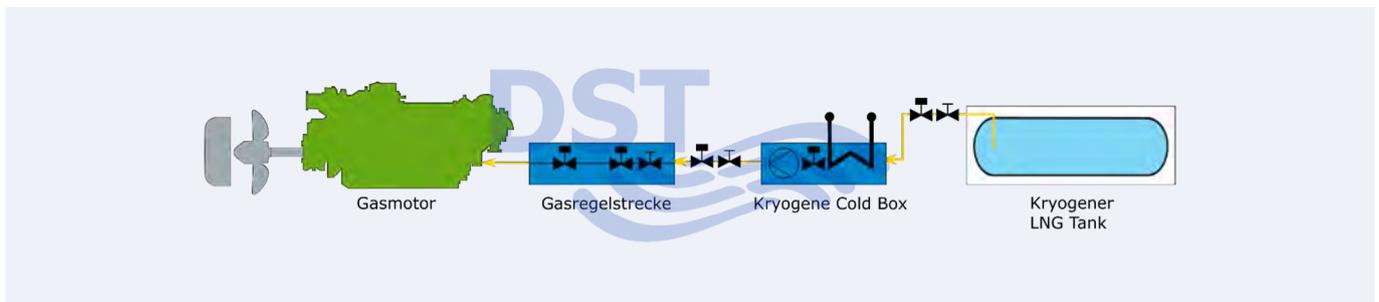


Abbildung 6 Komponenten eines LNG basierten Antriebs

Die Gasregelstrecke steuert den Gasfluss zum Motor und kann auch einen Notstopp durchführen.

- Die Gasleitungen sind doppelwandig ausgeführt und der Zwischenraum ist mit Stickstoff geflutet. Jede der Leitungen hat ein automatisches und ein handbetätigtes Ventil; Abschnitte der Leitungen haben zusätzlich ein Auslassventil. Die automatischen Ventile werden bei einer Notabschaltung geschlossen.

- In der Cold Box wird das LNG verdampft und unter Druck gesetzt. Die Energie (Wärme) für die Verdampfung kann aus dem Kühlwasser weiterer Motoren an Bord kommen. Dieser Teil der Anlage wird auch als Gasaufbereitungssystem bezeichnet. Rohrleitungen und Tanks haben Sicherheitsventile, um sie vor Überdruck zu schützen. Alle Systeme sind redundant ausgelegt.
- Es gibt zwei verschiedene Arten von LNG-Tanks: Membrantanks und Drucktanks. Für LNG als Kraftstoff ist nur die zweite Variante (IMO Type C Tank) interessant. Sie sind meist zylindrisch und haben entweder eine Schaum- oder eine Vakuumisolierung. Zur LNG-Entnahme wird meist ein sogenanntes Pressure-Build-Up (PBU)-System verwendet. Es besteht aus einem Wärmetauscher, der eine kleine Menge LNG verdampft. Das entstehende Gas wird zurück in den Tank geleitet und der steigende Druck bewirkt dann, dass das LNG aus dem Tank gedrückt wird. Für dieses System ist keine Pumpe, die für tiefkalte Temperaturen ausgelegt ist, erforderlich, was das System günstiger macht.

### **Umweltvorteil**

Die Verwendung eines reinen Gasmotors ist in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Methanschlupf vorteilhafter gegenüber einem Dual-Fuel Motor. Es können etwa 10% CO<sub>2</sub> Emissionen eingespart werden. Die zu Beginn der Einführung von LNG versprochene CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion um 25% konnte im Realbetrieb bisher nicht nachweislich erreicht werden. NO<sub>x</sub> und PM Emissionen erreichen mindestens Stage V Grenzwerte.

### **Verweis auf relevante Regelwerke**

Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN), Kapitel 30

### **Voraussetzungen für den Anwender**

Die Investition lohnt sich, bei einem ausreichend großem Energiebedarf eines konventionellen Binnenfrachtschiffes. Darüber hinaus muss genug Raum für die Tanks an Bord verfügbar sein. Das Schiff sollte eine Route befahren in der LNG-Bunkerstationen vorhanden sind.



### **Umweltvorteil**

Die Verwendung von Methanol in der Brennstoffzelle erzeugt keine gesundheitsschädlichen Emissionen. Wird Methanol als Kraftstoff für einen Verbrennungsmotor genutzt, sind die NOX- und Partikelemissionen vor der Abgasnachbehandlung gegenüber Diesel stark reduziert.

### **Verweis auf relevante Regelwerke**

Die Aufnahme von Methanol als Kraftstoff im Europäischen Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN) ist für das Jahr 2025 geplant.

### **Voraussetzungen für den Anwender**

Es wird aufgrund der geringeren Energiedichte von Methanol im Vergleich zu Diesel ein größeres Tankvolumen benötigt.

## 2.2.2 Wasserstoff

Wasserstoff ( $H_2$ ) ist unter Normalbedingungen ( $0\text{ °C}$  und  $1\text{ bar}$ ) gasförmig. Er kann als komprimiertes Gas oder als tiefkalte Flüssigkeit gespeichert werden. Die häufigsten Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff sind die Dampfreformierung (fossil) und die Wasserelektrolyse (mit erneuerbaren Energien möglich).

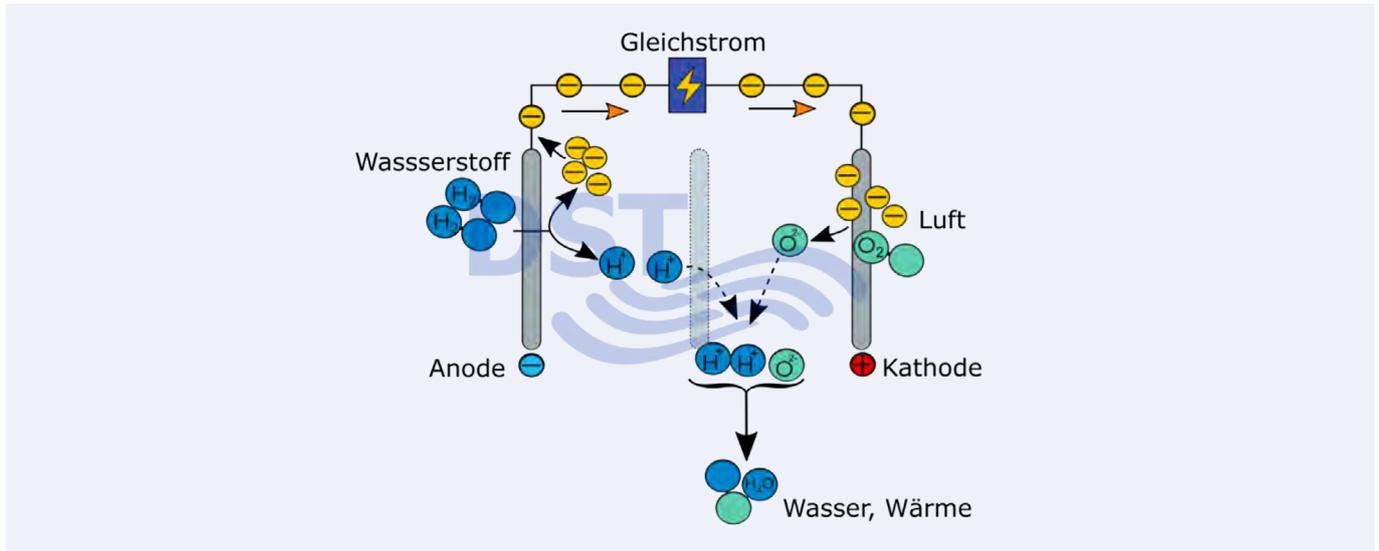


Abbildung 8 Funktionsprinzip der Brennstoffzelle

Bei der Verwendung von Wasserstoff in der Brennstoffzelle muss auf die Reinheit des Wasserstoffs geachtet werden. Prinzipiell kann jede Wasserstoffverunreinigung die Leistung und Lebensdauer des Brennstoffzellensystems beeinträchtigen. Die geforderte Reinheit ist insbesondere bei der Reformierung aus Erdgas, Kohle oder Methanol nur schwer zu erreichen. Die Wasserstoffreinheit sollte nach DIN EN 17124 99,97 Vol.-% betragen.

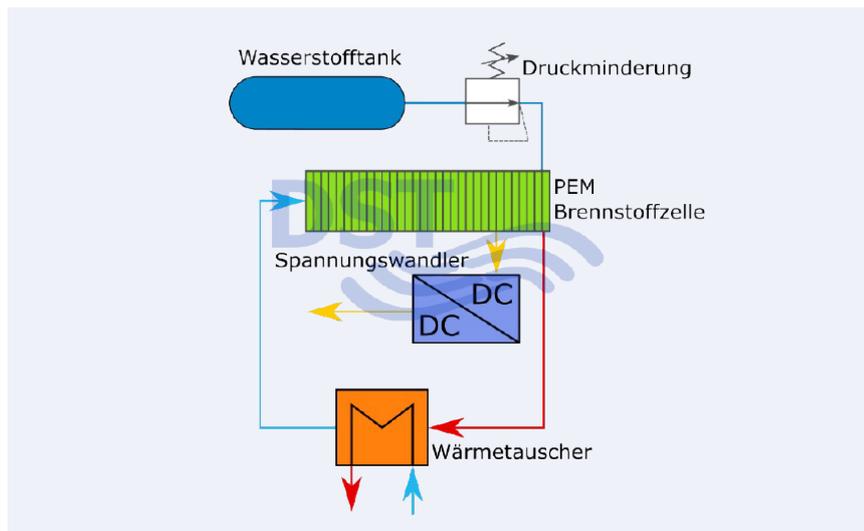
Wenn statt reinem Wasserstoff ein Speichermedium wie Methanol, Ammoniak oder LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) verwendet wird, wird der Wasserstoff an Bord aus dem Trägermedium mittels eines Reformers oder eines Crackers abgespalten.

### Technologiebeschreibung

In der Schifffahrt wird Wasserstoff derzeit entweder in einer PEM-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane) oder in einem angepassten Verbrennungsmotor eingesetzt. Andere Brennstoffzellentypen werden hier nicht betrachtet.

### Brennstoffzellen

Alle Brennstoffzellentypen basieren auf der Reaktion eines Brennstoffs (Wasserstoff) mit Sauerstoff. Die elektrochemische Reaktion erzeugt im Wesentlichen Strom, Wärme und Wasser. Von der Brennstoffzelle wird der Strom als Gleichstrom (DC) bereitgestellt. Wird zur weiteren Verwendung Wechselstrom (AC) benötigt, wird der DC aus der Brennstoffzelle zu einem Wechselrichter geleitet und dort in AC umgewandelt.



Der hohe Druck des Wasserstoffs im Tank wird in der Druckreduzierungseinheit auf ein für die Brennstoffzelle geeignetes Niveau gesenkt. Von dort wird der Wasserstoff in die Brennstoffzelle eingespeist. Der erzeugte elektrische Strom wird durch den Spannungswandler in die benötigte Bordspannung umgeformt. Die Reaktionswärme wird in einem separaten Wärmetauschersystem abgeführt.

Abbildung 9 Beispiel für eine Wasserstoff-Brennstoffzellenanlage

### Verbrennungsmotor

Wasserstoff kann nicht nur als Brennstoff für eine Brennstoffzelle, sondern auch für den klassischen Verbrennungsmotor verwendet werden. In letzter Zeit haben viele Hersteller mit der Entwicklung von Motoren in für die Binnenschifffahrt interessanten Leistungsklassen begonnen. Im Gegensatz zur Brennstoffzelle oder der Batterie werden für die Herstellung des Verbrennungsmotors keine seltenen Erden benötigt.

### Umweltvorteil (Emissionen von CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM etc.)

Beim Betrieb einer Brennstoffzelle entstehen keine schädlichen Emissionen. Die Kohlenstofffreiheit macht auch den Wasserstoffbetrieb des Verbrennungsmotors zumindest theoretisch CO<sub>2</sub>-, CO- und Kohlenwasserstofffrei. Im realen Betrieb sind jedoch aufgrund des Schmieröls in der Brennkammer Spuren von Kohlenwasserstoffen im Abgas nachweisbar. Die lokale Emission von Stickoxiden muss jedoch beachtet werden.

### Verweis auf relevante Regelwerke

Die Aufnahme von Brennstoffzellen im Europäischen Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN) ist für das Jahr 2023 geplant. Die technischen Anforderungen an die Speicherung von Wasserstoff sollen 2025 folgen.

### Voraussetzungen für den Anwender

Es ist ein größerer Platzbedarf für das Wasserstoff-Tanksystem sowie ggf. für Wechselbehälter notwendig.

## 2.3 Langfristige Lösungen

Bei den langfristig verfügbaren Technologien kann keine der am Anfang des Kapitels (siehe Seite 5) gestellten Fragen mit „Ja“ beantwortet werden. Bevor ein kommerzielles Binnenfrachtschiff ausgerüstet werden könnte, würde die Technologie erst einmal in einem Pilotprojekt erprobt werden. Mit den Erkenntnissen aus dem Projekt könnte dann zum Beispiel die Technologie weiterentwickelt werden oder auch schon mit dem Entwurf von technischen Empfehlungen und Vorschriften begonnen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Technologien erst nach 2035 eine Reife erreicht haben werden, dass sie in der kommerziellen Binnenschifffahrt in großem Umfang zum Einsatz kommen könnten.

### 2.3.1 Ammoniak

Auch die Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff und als Wasserstoffträger in der Binnenschifffahrt wird in Betracht gezogen. Da Ammoniak keinen Kohlenstoff enthält, ist es ein Kraftstoff außerhalb des Kohlenstoffkreislaufs und hat, abgesehen von möglichen Emissionen von Stickoxiden und Lachgas, keinen direkten Einfluss auf das Klima. Seit den 1940er Jahren gab es immer wieder Versuche, Ammoniak als Brennstoff zu etablieren. Heute wird Ammoniak im industriellen Maßstab hauptsächlich nach dem Haber-Bosch-Verfahren unter Verwendung von Stickstoff und Wasserstoff als Basis für Düngemittel hergestellt, wofür etwa 3 % der weltweit erzeugten elektrischen Energie benötigt werden. Bevor Ammoniak als klimafreundlicher Brennstoff eingesetzt werden kann, müssen neue Verfahren zu seiner Herstellung angewendet werden.

Ammoniak hat als Speichermedium für Wasserstoff den großen Vorteil, dass die Wasserstoffdichte höher ist, als in komprimiertem oder verflüssigtem Wasserstoff. Zudem kann Ammoniak mit moderatem Druck- oder Temperaturniveau (8,6 bar oder -33 °C) verflüssigt werden. Diese Werte entsprechen ungefähr denen für LPG und machen das Tanksystem deutlich günstiger als einen LNG-Tank. Da Ammoniak schon lange in anderen Industriezweigen eingesetzt wird, kann trotz der korrosiven Wirkung auf zahlreiche Metalle und Kunststoffe, auf viele Standardbauteile zurückgegriffen werden, was die Systemkosten ebenfalls niedrig hält.

Beim Einsatz an Bord muss die Toxizität von Ammoniak berücksichtigt werden. Auch hier könnte aber auf Standardprozeduren aus anderen Industriezweigen zurückgegriffen werden. Da die Motorentechnologie noch nicht kommerziell verfügbar ist, ist Ammoniak kein unmittelbar einsatzfähiger Kraftstoff für die Binnenschifffahrt. Wenn jedoch die oben beschriebenen Hindernisse überwunden werden, könnte Ammoniak entweder direkt als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor oder als Wasserstoffquelle für eine Brennstoffzelle genutzt werden.

#### Technologiebeschreibung

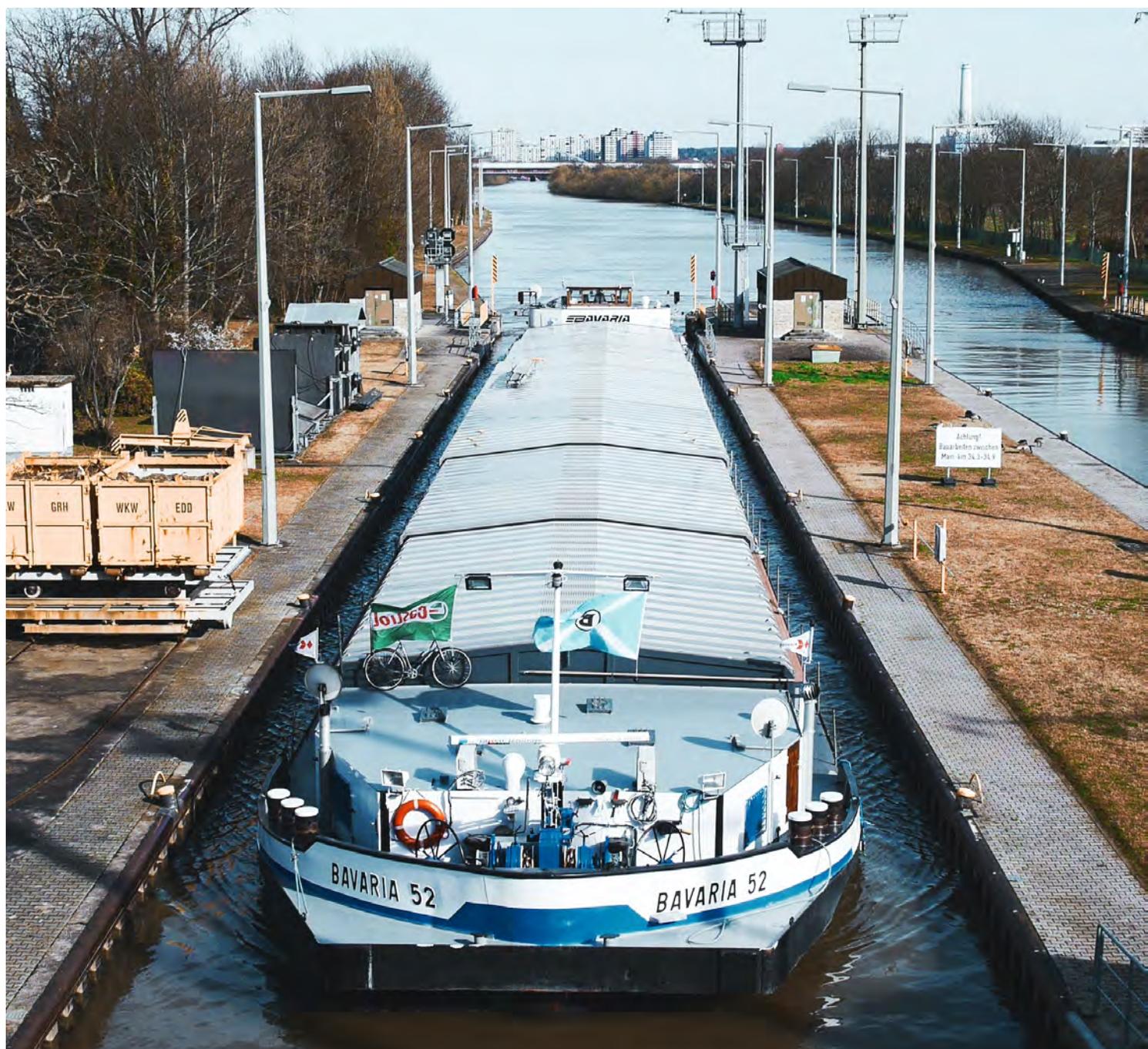
Wenn Ammoniak als Wasserstoffquelle für eine Brennstoffzelle verwendet wird, wird an Bord mittels eines Crackers die Verbindung zwischen Stickstoff und Wasserstoff aufgespalten. Für den Verbrennungsmotor gibt es entweder die Option Dual-Fuel Motor oder als Gasmotor, dem zur Erzielung der Zündfähigkeit Wasserstoff zugeführt wird.

### Umweltvorteil (Emissionen von CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM etc.)

Das kohlenstofffreie Ammoniak erzeugt keine CO<sub>2</sub> Emissionen. Der Bildung von NO<sub>x</sub> und dem klimaschädlichen Lachgas N<sub>2</sub>O kann durch entsprechende Motoreinstellung entgegengewirkt werden, bzw. durch eine Abgasnachbehandlung. Partikel werden durch die motorische Verbrennung selbst nicht erzeugt, können aber durch Schmierstoffe und Abrieb in geringem Maße entstehen. Bei der Verwendung von Ammoniak als Wasserstoffträger für eine Brennstoffzelle entstehen bei der chemischen Reaktion in der Brennstoffzelle keine Schadstoffe.

### Verweis auf relevante Regelwerke

Ammoniak ist noch nicht als Kraftstoff zugelassen. Für den Einsatz müsste eine Ausnahmegenehmigung beantragt werden.





**Das ESSF-Portal:  
Sammlung.  
Lösungen.  
Technologien.**

## 3 DAS ESSF-INFORMATIONSPORTAL

Das Informationsportal wurde durch die Arbeitsgruppe für nachhaltige alternative Energieversorgung von Schiffen (SAPS) der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Forums für nachhaltige Schifffahrt (ESSF) aufgebaut.

Der Inhalt wird laufend mit überwiegend externen Quellen, ebenso wie durch die SAPS-Expertengruppe aktualisiert und ergänzt. Die Mitglieder der Expertengruppe kommen aus ganz Europa aus den Bereichen Energieversorger, Schiffseigner, Werften, Hafenbehörden bis hin zu Flaggenstaaten, Ministerien, Klassifikationsgesellschaften, Motorenherstellern, Kraftstoffhersteller, Verbände und Non-Governmental Organisations (NGO).

Um schon in der Konzeptionsphase eines Schiffes den Einsatz alternativer Kraftstoffe bewerten zu können, hat das niederländische Forschungsinstitut MARIN die Ship Power & Energy Concept-Analyse (SPEC-Analyse) entwickelt. Die SPEC-Analyse kann in einem frühen Stadium eines Schiffsentwurfs oder auch bei einer Nachrüstung eingesetzt werden, um die Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe und die Reduzierung der Treibhausgasemissionen eines kombinierten Systems zu vergleichen.

Parallel dazu wurde das Portal <https://sustainablepower.application.marin.nl/> aufgebaut, um die Daten über grundlegenden Eigenschaften der Komponenten der alternativen Kraftstoffe und der zugehörigen Systeme zur Energiespeicherung und Energieumwandlung zusammenzustellen.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen, unter denen ein Schiff fahren soll, können Technologien zusammengestellt werden und für die weitere Analyse ausgewählt werden.

### 3.1 Hinweise zur Anwendung des ESSF-Portals

Die Datenbank wird ständig mit neuen Erkenntnissen über alternative Kraftstoffe und Energiewandlungstechnologien für die Schifffahrt, einschließlich ihrer Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit bei einem vollständigen Well-to-Wake-Ansatz sowie Lebenszyklusbetrachtungen aktualisiert.

Um einen fairen und transparenten Überblick zu gewährleisten, werden alle möglichen ausgereiften und aufkommenden Lösungen erfasst und als Referenz Energieträger, die auf fossilen Ressourcen basieren, mit einbezogen.

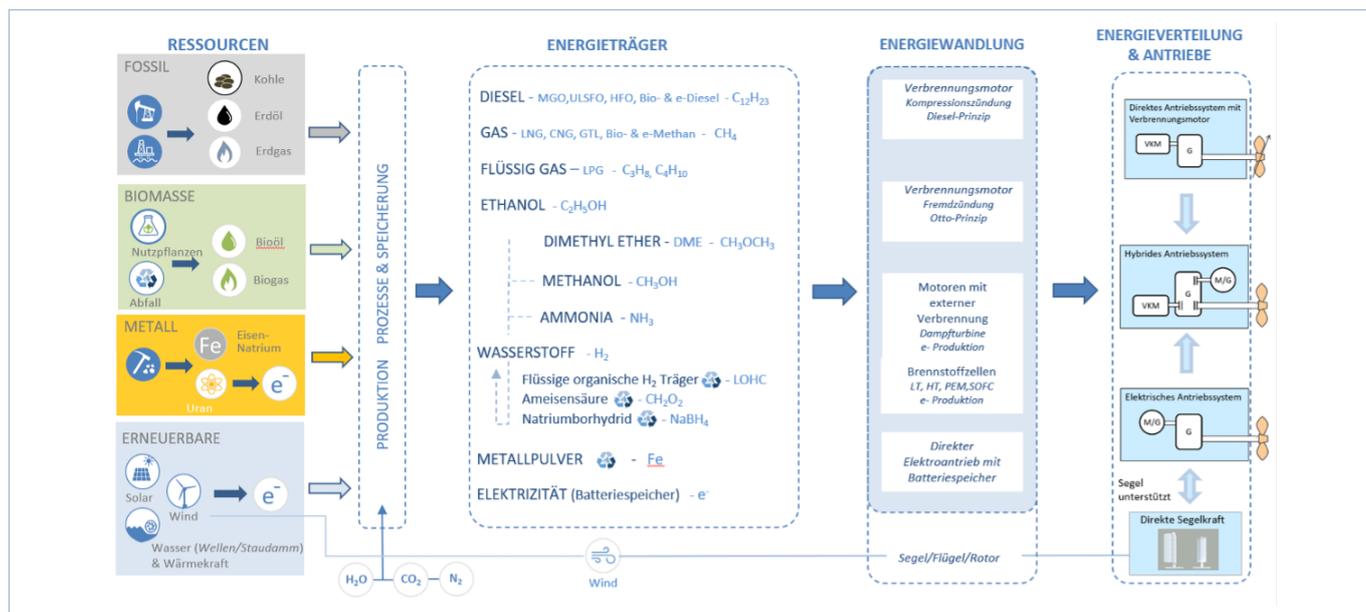


Abbildung 10 Um die so genannten „Well-to-Tank“ (WTT)-Auswirkungen in Bezug auf Emissionen zu bestimmen, sind die Quelle und der Produktionsprozess eines Energieträgers erforderlich. In Bezug auf das Schiff werden die folgenden Elemente unterschieden: Energieträger, Energieumwandlung und Energieverteilung und -antrieb.

Die vom Schiff lokal verursachten Emissionen werden als Tank-to-Wake-Emissionen (TTW) bezeichnet. Die Gesamtemissionen eines fahrenden Schiffes, die Well-to-Wake-Emissionen (WTW), setzen sich zusammen aus den Emissionen, die durch die Produktion des Energieträgers entstehen, und den Emissionen, die durch den Betrieb des Schiffes verursacht werden: „WTT-Emissionen + TTW-Emissionen = WTW-Emissionen“.

Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Registerkarten im Menü des Portals:



**Home** Auf der Startseite finden Sie eine Einleitung in die Möglichkeiten des Portals und am Seitenende die E-Mail-Adresse, an die Sie Ihr Feedback senden können.

**Data Table** Die Registerkarte Data Table bietet einen Überblick über die Eigenschaften der verschiedenen in die Datenbank eingegebenen Komponenten, einschließlich der Referenz. Es kann mehrere Einträge für jede Eigenschaft geben, die gemittelt werden, um die in der Analyse verwendeten Werte zu erhalten. Es gibt ein Dropdown-Menü unter System Type zur Auswahl der Komponente (Energieträger, Energieverteilung und Antriebe, Abgasnachbehandlung, Zusatzkomponenten, Energieumwandlung). Eine Eigenschaft einer Komponente kann über das Dropdown-Menü Feature ausgewählt werden. Rechts ist die Quelle für die Informationen gegeben.

**Energy carriers**

Die Registerkarte Energy carriers (Energieträger) zeigt die Eigenschaften für jeden der alternativen Brennstoffe. Die aktuell verfügbaren Eigenschaften sind: Basisinformationen wie energetische Eigenschaften und Kosten (Table), Well-to-Tank- und Tank-to-Wake-Emissionen. Im Diagramm 3-variable scatter plot for energy carriers können verschiedene Eigenschaften ausgewählt werden und mehrere Energieträger miteinander verglichen werden.

**Well-to-Wake**

Die Registerkarte Well-to-Wake gibt die Eigenschaften von kombinierten Lösungen an. Dazu gehören der Kraftstoff (Energieträger), ein Energiewandler und das Getriebe. Für diese Kombinationen werden die Energieeffizienz, die Treibhausgasemissionen und die Kraftstoffkosten im Verhältnis zu der auf den Propeller übertragenen Energie angegeben. Die Energieeffizienz gibt das Verhältnis zwischen der im Kraftstoff enthaltenen Energie und der auf den Propeller übertragenen Energie an.

**Pathways**

Die Registerkarte Pathways zeigt ebenfalls die kombinierten Lösungen, jedoch mit der Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu einem Referenzkraftstoff. Die Linien zeigen die Kombination der Komponenten in einer Lösung und die Emissionsreduktion an.



Wir streben eine  
CO<sub>2</sub>-Reduzierung  
von mindestens  
55 % an.

## 4 BEISPIELANWENDUNG: MÖGLICHKEITEN ZUR SENKUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN UM 55 % ODER MEHR BEI EINEM SCHUBBOOT

Das Auslegungsbeispiel ist für ein großes Schubschiff (z. B. VEERHAVEN Schubschiff, Länge 40 m) und ein kleineres Schubschiff (z. B. DONAU von Frank Rycquart Scheepvaart, Länge 22,5 m). Diese dienen als Ausgangspunkt im Hinblick auf das Fahrprofil, den Einsatz und die Autonomie (Anzahl der Tage und Stunden, die ohne Bunkern gefahren werden können). Bei der Auslegung des großen Schubschiffes werden auch längere Niedrigwasserperioden berücksichtigt.



Abbildung 11 Beispielhafte Fotos von einem vergleichbaren großen Schubschiff (links) und einem kleinen Schubschiff (rechts)

<sup>5</sup> Das Beispiel ist einer Studie entnommen.

Diese kann unter <https://www.marin.nl/nl/news/emissiereductie-duwboten> (auf Niederländisch) eingesehen werden.

<sup>6</sup> Bild aufgenommen von W. de Boer

<sup>7</sup> Quelle: <https://www.binnenvaartspotter.nl/duw-en-sleepboten/donau/>

## 4.1 Ziel der Auslegung

Die Untersuchung möglicher grüner Kraftstoffe wird mit dem MARIN SPEC-Tool durchgeführt, um kurz- und längerfristige Optionen zu erkennen. Die Optionen werden dann im Hinblick auf die Auswirkungen auf Volumen und Gewicht der wichtigsten Komponenten für die Energiespeicherung und die Umwandlung dieser Energie in Antriebs- und Hilfsenergie bewertet. Nun werden die Optionen ausgewählt, mit denen eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung von mindestens 55 % (Green-Deal-Anforderung für das Jahr 2030) möglich ist und die technisch realisierbar ist. Es werden auch die Anforderungen in Bezug auf andere Schadstoffemissionen beachtet. Anschließend wurde ein umfassender Entwurf für die beiden Schubschiffe entwickelt. Dieser beinhaltet eine schematische, allgemeine Anordnung mit den wichtigsten Komponenten und der Überprüfung des Schiffsgewichts. Der Zeitplan geht davon aus, dass das Schiff die Emissionsziele für 2030 erfüllen kann, Konstruktion und Bau 2022/2023 stattfinden und das Schiff 2024 in Betrieb geht.

## 4.2 Relevante Vorüberlegungen

Auf der Grundlage des Einsatzprofils und der maximalen Abmessungen der Schubschiffe werden die Optionen für verschiedene Energieträger und Antriebssysteme analysiert:

- Mit welchem Energieträger kann die angestrebte Emissionsminderung erreicht werden?
- Ist die Technologie für die Lagerung des Energieträgers an Bord und für die Energiewandler so weit fortgeschritten, dass man sie in wenigen Jahren beim Bau eines solchen Schubschiffes einsetzen kann? Und wird auch die Abgasnorm Stage V berücksichtigt?
- Wie sieht es mit der Verfügbarkeit dieses alternativen Treibstoffs entlang der Schiffsroute aus?

## 4.3 Optionen für die Neumotorisierung

Die nachstehenden Abbildungen zeigen den Vergleich der verschiedenen Kraftstoff-Optionen für das kleinere Schubboot. Die Verwendung von Methanol oder Ammoniak führt zu der angestrebten Treibhausgasreduzierung, allerdings auch zu einer geringeren Autonomie und höheren Kraftstoffkosten.

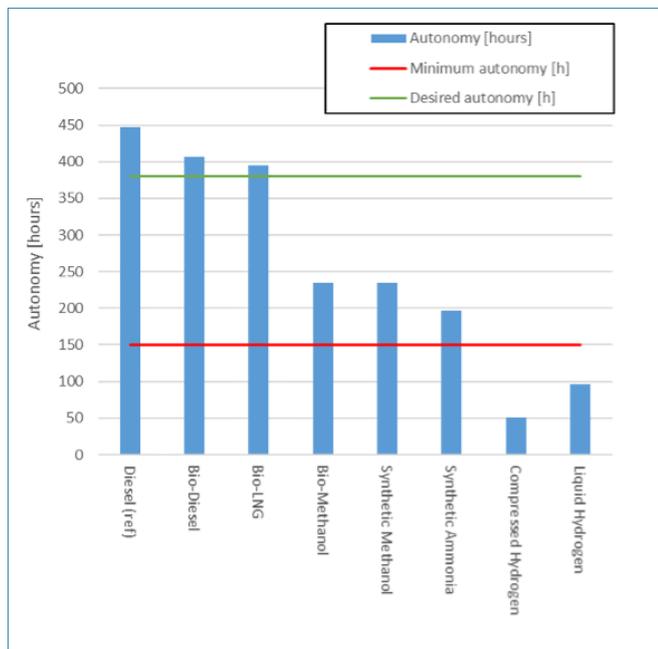


Abbildung 12 Reichweite in Stunden mit verschiedenen Kraftstoffoptionen

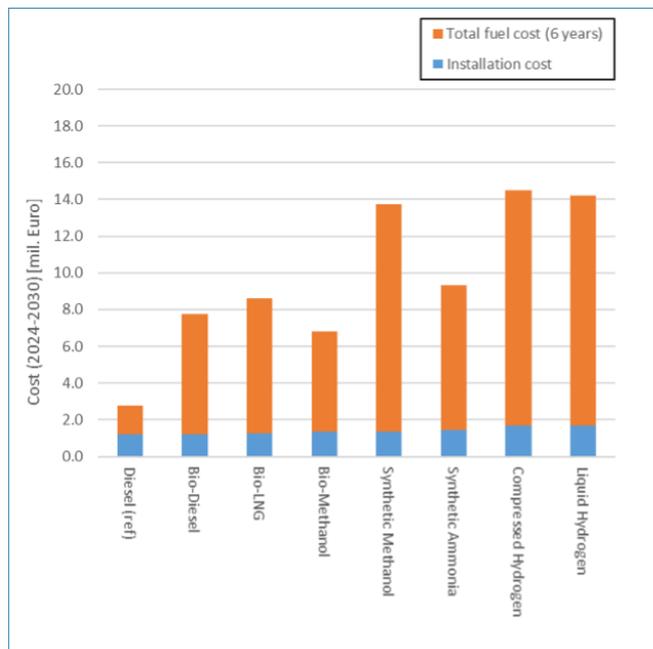


Abbildung 13 Investitions- und Betriebskosten für verschiedene Antriebstechnologien

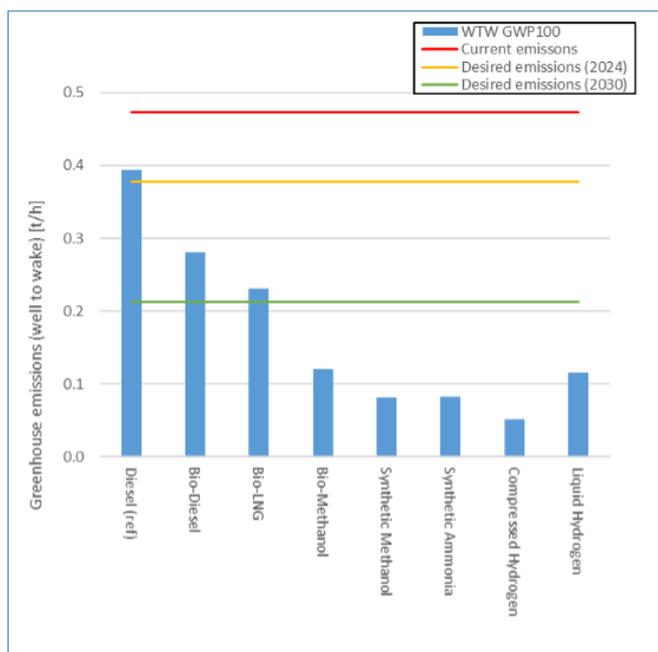


Abbildung 14 Vergleich der klimawirksamen Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für die Kette von der Quelle bis zum Propellernachstrom

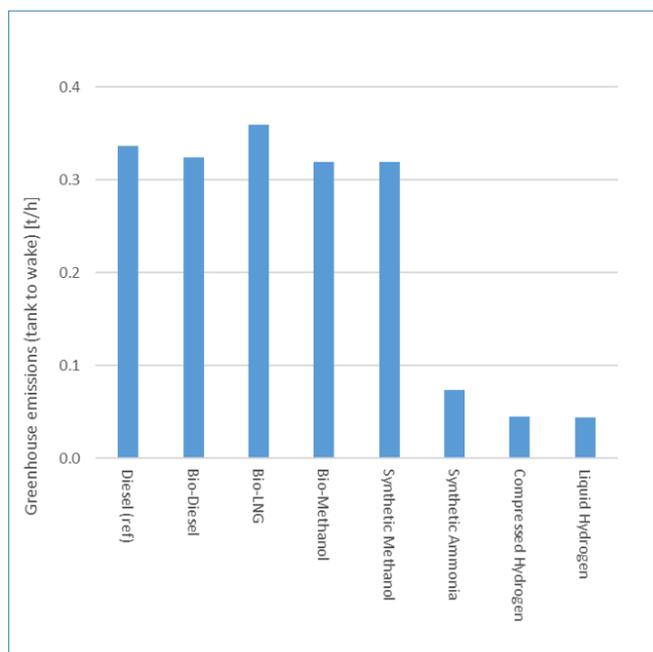


Abbildung 15 Vergleich der klimawirksamen Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für die Kette vom Tank bis zum Propellernachstrom

Zusammenfassend ergibt der Vergleich der verschiedenen alternativen Kraftstoffe folgende Erkenntnisse (Stand Ende 2020):

- **Batterien** und **Wasserstoff** bieten das größte Potenzial zur Reduzierung von Treibhausgasen und anderen schädlichen Emissionen. Allerdings bedeutet die Verwendung von Batterien derzeit eine sehr begrenzte Autonomie. Auch Wasserstoff benötigt viel Platz und Gewicht, was ebenfalls zu einer begrenzten Autonomie führt.
- Durch den Einsatz von **Methanol** und **Ammoniak** können die Treibhausgase ebenfalls stark reduziert werden. Bei beiden Kraftstoffen wird für die Verbrennung auch Diesel benötigt und beide erfordern eine Abgasnachbehandlung, um die verbleibenden Schadstoffemissionen zu verringern. Methanol schneidet etwas besser ab, wenn es um die Reduzierung anderer Emissionen geht.

- Die Verwendung von **Bio-LNG** kann zu einer beträchtlichen Verringerung der Treibhausgase führen, liegt aber etwas unter dem verschärften Ziel für 2030 (55 % Verringerung). Bio-LNG schneidet bei den (geringen) Emissionen und den Schadstoffemissionen gut ab.
- Bei der Verwendung von **Biodiesel** hängt die Reduktion der Treibhausgase von der Art des Biodiesels ab. Hier muss ebenfalls eine Abgasnachbehandlung eingesetzt werden.

#### 4.4 Auswahl der besten Konzepte

Auf der Grundlage dieses Vergleichs wurde eine Entscheidung für einen alternativen Kraftstoff getroffen, um das eigentliche Konzept zu entwickeln. Folgende Fragestellungen wurden dabei betrachtet

- Ist die angestrebte CO<sub>2</sub>-Reduktion bis 2030 zu erreichen, wenn z. B. im Jahr 2023 ein neues Schubschiff gebaut wird?
- Sind die Techniken ausreichend ausgereift und wird der alternative Treibstoff verfügbar sein, wenn das Schiff z. B. 2024 in Dienst gestellt wird?

Die Kombination von mindestens 55 % CO<sub>2</sub>-Reduktion und dem Bau des Schubbootes im Jahr 2023 ist nicht machbar. Der Bau des Schubbootes im Jahr 2023 bedeutet, dass man sich für Biodiesel oder Bio-LNG entscheiden muss, außerdem muss das System nach Stufe V zertifiziert sein. In diesem Fall wird nach derzeitigen Erkenntnissen die angestrebte CO<sub>2</sub>-Reduktion von 55 % nicht erreicht werden.

Letztendlich wurde beschlossen, nicht mit einem Entwurf mit Biodiesel oder Bio-LNG fortzufahren, denn es gibt genügend Erfahrung mit Dieselmotoren und auch für LNG gibt es bereits Entwürfe. Ausgehend von der zu erreichenden Autonomie sind Methanol und Ammoniak die Hauptkandidaten (Stand Ende 2020). Aufgrund der toxischen Eigenschaften von Ammoniak und der noch wenig ausgereiften Technik wurde beschlossen, Methanol als Energieträger für die Konstruktion der Schubfahrzeuge zu wählen.

Anschließend wurde ein Entwurf erstellt, um die wichtigsten Komponenten auf dem verfügbaren Raum unterzubringen.

Für das **große Schubschiff** wird ein Tiefgang von 1,60 m für das Fahren bei niedrigen Wasserständen angesetzt. Daraus ergaben sich zwei Lösungen, beide mit einer größeren Breite im Vergleich zum aktuellen Schiff. Bei beiden Entwürfen war es möglich, den Methanoltank auf dem Deck zu platzieren:

1. Konzeptentwurf mit direktem Antrieb auf die Propellerwelle, Länge 40 m, Breite 18,5 m
2. Konzeptentwurf mit elektrischem Antrieb auf der Propellerwelle, Länge 40 m, Breite 20 m. Dieser Entwurf ist schwerer, vor allem aufgrund des zusätzlichen Gewichts, das durch die Verwendung von Generatoren in Kombination mit Elektromotoren entsteht. Die Breite wurde auf 20 m vergrößert, um mit geringem Tiefgang fahren zu können. (Diese Breite ist in der Praxis möglicherweise nicht realisierbar.)

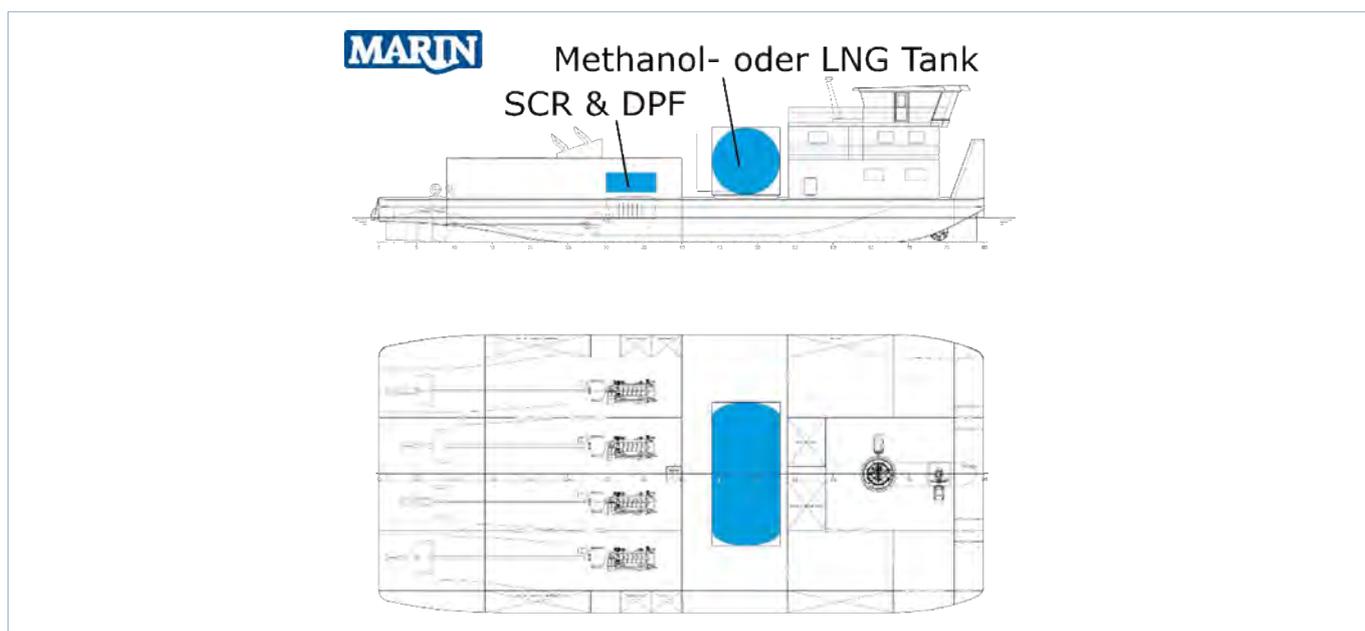


Abbildung 16 Platzierung des Tanks und der Abgasnachbehandlung auf dem großen Schubschiff

Auch für das **kleine Schubschiff**, für welches kein Mindesttiefgang vorgeschrieben ist, wurden zwei Lösungen entwickelt:

1. Konzept mit direktem Propellerwellenantrieb
2. Konzept mit Generatoren im Bug und Ruderpropellern

Bei beiden Varianten ist aufgrund der begrenzten Abmessungen des Schubbootes kein Platz für einen Methanoltank an Deck. Der verfügbare Platz an Deck wird für die Unterkünfte und das Steuerhaus benötigt. Daher werden die Methanoltanks unter Deck platziert, wobei ein ausreichender Inspektionsabstand von 80 cm eingehalten wird.

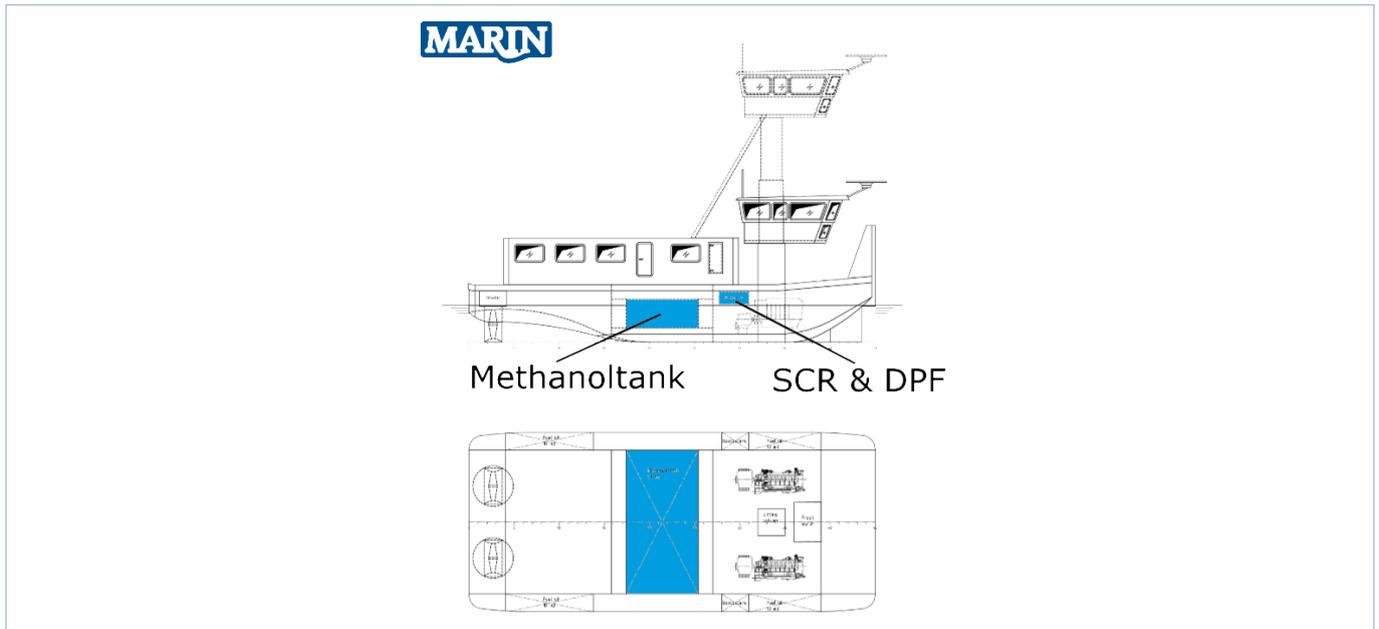


Abbildung 17 Platzierung des Tanks und der Abgasnachbehandlungsanlage auf dem kleinen Schubschiff

#### 4.5 Bewertung der gewählten Konzepte

Die wichtigsten Schlussfolgerungen dieser Studie waren:

1. Für ein Schubschiff, das 2021 entworfen und 2022/2023 gebaut werden soll, sind die Anforderungen der Stufe V maßgeblich und die Verwendung von Biodiesel oder Bio-LNG ist die praktikabelste Option. Ein wichtiger Punkt ist das Herstellungsverfahren für den Biokraftstoff. Außerdem wird bei der Verwendung von Bio-LNG die Freisetzung von Methan (Methanschlupf) zu einer geringeren Reduzierung der Treibhausgase führen. Eine Reduktion von 55%, wie sie bis 2030 angestrebt wird, ist bei einer solchen Konstruktion eher nicht möglich.
2. Für die Konzeption und den Bau eines „möglichst klimaneutralen Schubfahrzeugs“, das um das Jahr 2024 in Betrieb genommen werden soll, scheint ein Dual-Fuel-Verbrennungsmotor mit Methanol und Diesel eine technisch machbare Option zu sein, was jedoch nicht für die kommerzielle Verfügbarkeit eines solchen Verbrennungsmotors gilt. Es ist anzumerken, dass die Verfügbarkeit von Methanol entlang der Wasserstraße noch nicht sichergestellt ist. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist Bio-Methanol im Vergleich zu Diesel etwa doppelt so teuer. Die Produktionsmöglichkeiten sind jedoch begrenzt. Die Kosten für die Verwendung von synthetischem Methanol werden heute (zweites Halbjahr 2020) um den Faktor 4 bis 5 höher eingeschätzt als bei der Verwendung von Diesel. Dabei ist zu beachten, dass ein solcher Motor auch die Anforderungen der Stufe V erfüllen muss.