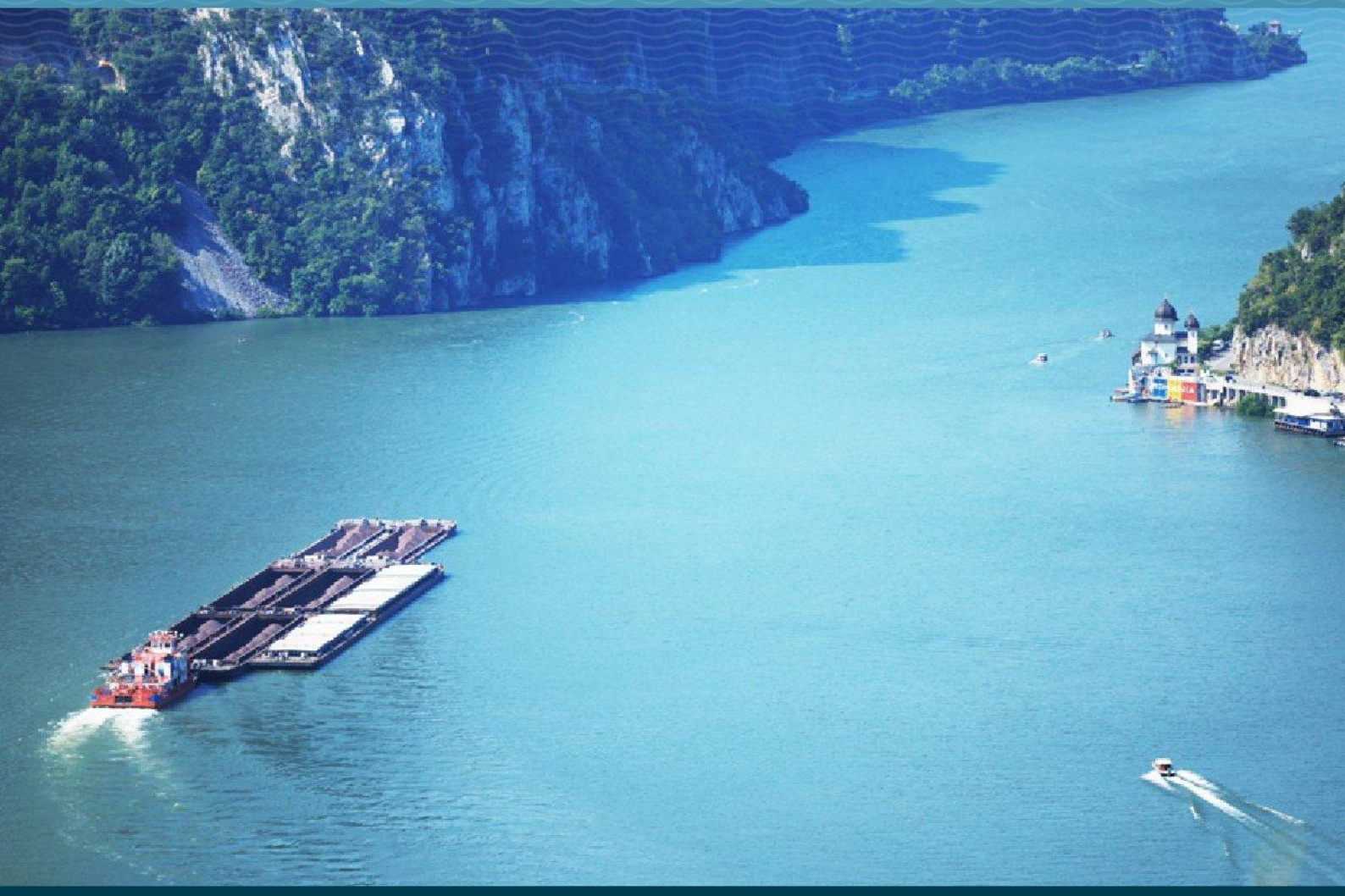
Aristoi / viadonau

# Studie zu alternativen Antriebsformen auf der Donau



viadonau



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... 3
1 Einleitung ..... 6
2 Aktuelle Antriebssysteme: Bewertung der vorherrschenden Antriebssysteme ..... 7
2.1 Donau-Flotte: Zahlen ..... 7
2.2 Schiffstypen: Operative Profile pro Strecke ..... 8
2.3 Status quo der Umweltauswirkungen (repräsentative Fahrten basierend auf Daten von PROMINENT) ..... 10
3 Alternative Antriebstechnologien: Neue Horizonte ..... 13
3.1 Biokraftstoffe ..... 13
3.1.1 Technische Machbarkeit ..... 14
3.1.2 Wirtschaftliche Analyse ..... 15
3.1.3 Ökologische Merkmale: Emissionen und Nachhaltigkeit ..... 15
3.1.4 Soziale Konsequenzen ..... 15
3.1.5 Pilotprojekte ..... 16
3.2 Elektrischer Antrieb ..... 18
3.2.1 Technische Machbarkeit ..... 18
3.2.2 Ökonomische Analyse ..... 19
3.2.3 Ökologische Merkmale: Emissionen und Nachhaltigkeit ..... 19
3.2.4 Soziale Konsequenzen ..... 19
3.2.5 Pilotprojekte ..... 20
3.2.6 Fazit ..... 20
3.3 Wasserstoff ..... 20
3.3.1 Technische Machbarkeit ..... 21
3.3.2 Ökonomische Analyse ..... 21
3.3.3 Ökologische Merkmale und Emissionen ..... 22
3.3.4 Soziale Konsequenzen ..... 23
3.3.5 Pilotprojekte ..... 23
3.3.6 Fazit ..... 24
3.4 Methanol ..... 24
3.4.1 Technische Umsetzbarkeit ..... 24
3.4.2 Ökonomische Analyse ..... 24
3.4.3 Ökologische Merkmale und Emissionen ..... 25
3.4.4 Soziale Konsequenzen ..... 25
3.4.5 Pilotprojekte ..... 26
3.5 Ammoniak ..... 27

3.5.1 Technische Durchführbarkeit ..... 27
3.5.2 Ökonomische Analyse ..... 27
3.5.3 Umweltmerkmale: Emissionen und Nachhaltigkeit ..... 28
3.5.4 Soziale Konsequenzen ..... 28
3.5.5 Pilotprojekte und Blaupausen ..... 29
3.5.6 Fazit ..... 29
3.6 Hybride Systeme ..... 30
3.7 Geschätzte Kosten ..... 30
4 Infrastruktur und Logistik: Vorbereitung der Grundlagen für Veränderung ..... 32
4.1 Der aktuelle Status der Kraftstoffinfrastruktur (Donau) ..... 32
4.2 Vorbereitungen für alternative Kraftstoffinfrastruktur entlang der Donau ..... 33
4.2.1 Biokraftstoffe (HVO, FAME) ..... 33
4.2.2 Wasserstoff (H2) ..... 34
4.2.3 Methanol ..... 40
4.2.4 Ammoniak ..... 42
4.3 Einheitliche Infrastrukturinvestitionen für alle Kraftstoffe ..... 42
4.4 Weitere relevante Infrastruktur für Alternative Antriebe auf der Donau: Landstrom und Erkenntnisse von LNG ..... 43
5 Vergleich alternativer Antriebssysteme & Regulierung ..... 44
5.1 Ammoniak, Wasserstoff und Methanol ..... 44
5.3 RED III und ETS 2 ..... 49

# Executive Summary

Diese Studie untersucht das Potenzial und die Herausforderungen bei der Einführung alternativer Antriebstechnologien in der Binnenschifffahrt auf der Donau. Sie beleuchtet den ökologischen und wirtschaftlichen Handlungsdruck auf den Sektor, insbesondere vor dem Hintergrund der ehrgeizigen Klimaziele der Europäischen Union.

Die Binnenflotte der Donau, die weitgehend von Dieselantrieb abhängig ist, trägt wesentlich zu CO2 und Schadstoffemissionen bei. Die alternde Flotte und langsame Einführung neuer Technologien stellen sowohl Herausforderungen, als auch Chancen für den Übergang zu umweltfreundlicheren Antriebsmethoden dar.

Wichtige alternative Antriebstechnologien, die in dieser Studie evaluiert werden umfassen Biokraftstoffe, elektrischen Antrieb, Wasserstoff, Methanol und Ammoniak. Jede der Technologien wird hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Umweltauswirkungen, sowie sozialen Konsequenzen analysiert. Die Studie identifiziert auch Pilotprojekte und Best Practices, die derzeit in Europa implementiert werden.

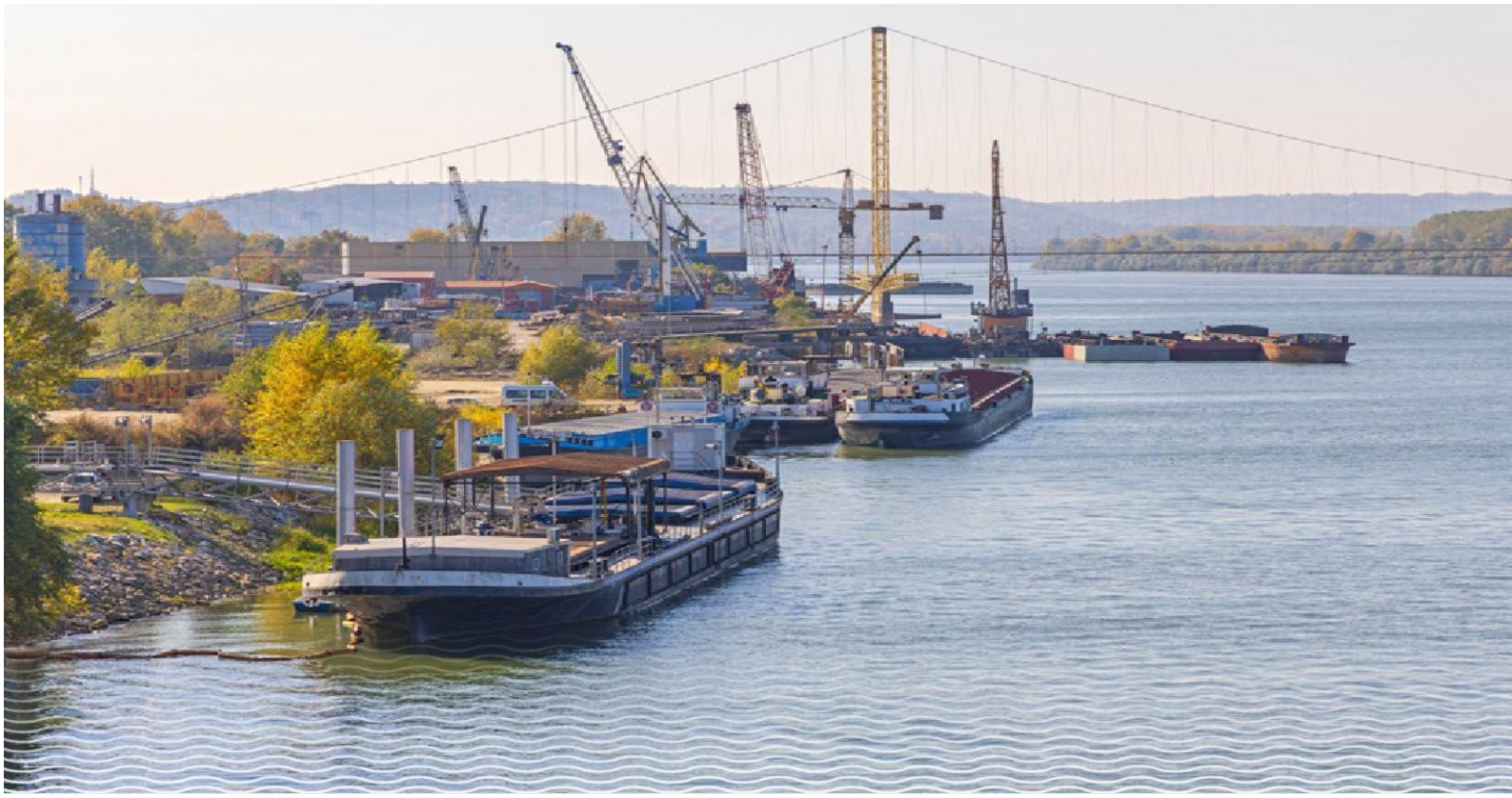
- Wasserstoff und Methanol werden als mittel- bis langfristige Lösungen für die Dekarbonisierung des Sektors angesehen, obwohl sie erhebliche Investitionen in die Lagerung, Sicherheitssysteme und Verteilungsinfrastruktur erfordern.
- Ammoniak ist vielversprechend, aber seine Toxizität und die Komplexität des Umschlags macht ihn in der Praxis kurzfristig weniger praktikabel.

**Die Studie zieht mehrere wichtige Schlussfolgerungen:**

- Biokraftstoffe stellen aufgrund ihrer Kompatibilität mit bestehenden Motoren und Infrastruktur eine kurzfristige Lösung dar, aber ihre langfristige Adoption hängt von der nachhaltigen Produktion und regulatorischen Unterstützung ab.
- Der elektrische Antrieb bietet emissionsarme Vorteile ist jedoch durch die aktuelle Batterietechnologie und Infrastrukturherausforderungen eingeschränkt. Er eignet sie hauptsächlich für Kurzstreckenbetriebe.
- Wasserstoff und Methanol werden als mittel- bis langfristige Lösungen für die Dekarbonisierung des Sektors angesehen, obwohl sie erhebliche Investitionen in die Lagerung, Sicherheitssysteme und Verteilungsinfrastruktur erfordern.
- Ammoniak ist vielversprechend, aber seine Toxizität und die Komplexität des Umschlags macht ihn in der Praxis kurzfristig weniger praktikabel.

Der Bericht betont die Notwendigkeit erheblicher Investitionen in die Infrastruktur, wie beispielsweise in Treibstoffbunkerstationen und Lieferketten, um die alternativen Kraftstoffe zu unterstützen.
Die Zusammenarbeit zwischen Regierungen, privaten Akteuren und internationalen Organisationen ist entscheidend auf dem Weg zu einer grüneren Zukunft für den Binnenschifffahrtstransport auf der Donau.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Übergang zu alternativen Antriebssystemen zwar komplex und kostspielig, aber notwendig zur Verringerung der Emissionen und zur Angleichung an die EU-Vorschriften in Bezug auf die Dekarbonisierungsziele ist. Der Bericht enthält sowohl für kurz- als auch für langfristige Maßnahmen strategische Empfehlungen - einschließlich öffentlich-privater Partnerschaften, regulatorischer Anreize und Pilotprojekten, die den Weg zu einer nachhaltigeren Binnenschifffahrtsbranche auf der Donau ebnen können.



# 1 Einleitung

Die Binnenschifffahrt (BS) auf der Donau spielt eine entscheidende Rolle im europäischen Logistiknetz, steht jedoch zunehmend vor der Herausforderung, ihre $CO_2$-Emissionen zu reduzieren und damit den regulatorischen Anforderungen sowie den ökologischen Zielsetzungen gerecht zu werden. Die Studie untersucht das Potenzial alternativer Antriebstechnologien zur deutlichen Verringerung der Emissionen in diesem Sektor. Durch die Bewertung bestehender Antriebssysteme und die Analyse innovativer Alternativen zeigt der Bericht mögliche Wege für den Übergang zu umweltfreundlicheren und nachhaltigeren Antriebslösungen auf.

Der Aufbau der Studie ist so gestaltet, dass der Leser durch die wichtigsten Aspekte dieses Übergangs geführt wird, beginnend mit einer Bewertung des aktuellen Zustands der Binnenschifffahrtsflotte und der Antriebssysteme auf der Donau, hin zu einer Analyse möglicher alternativer Technologien. Der Bericht konzentriert sich auf die infrastrukturellen, logistischen und sozialen Herausforderungen, die bewältigt werden müssen, um diesen Übergang zu ermöglichen

**Kapitel 2:**
**Aktuelle Antriebssysteme: Bewertung der vorherrschenden Antriebssysteme**
Dieses Kapitel enthält eine eingehende Bewertung der derzeit in der Donauschifffahrt eingesetzten Antriebssysteme, wobei der Schwerpunkt auf Dieselmotoren liegt. Es enthält eine Aufschlüsselung der Schiffstypen, Betriebsprofile und Umweltauswirkungen. Durch die Ermittlung der Basiswerte für Emissionen und der Leistung der derzeitigen Flotte, wird in diesem Kapitel die Grundlage für das Verständnis der Dringlichkeit der Umstellung auf alternative Technologien gelegt.

**Kapitel 3:**
**Alternative Antriebstechnologien: Neue Horizonte**
Dieses Kapitel enthält eine eingehende Bewertung der derzeit in der Donauschifffahrt eingesetzten Antriebssysteme, wobei der Schwerpunkt auf Dieselmotoren liegt. Es enthält eine Aufschlüsselung der Schiffstypen, Betriebsprofile und Umweltauswirkungen. Durch die Ermittlung der Basiswerte für Emissionen und der Leistung der derzeitigen Flotte, wird in diesem Kapitel die Grundlage für das Verständnis der Dringlichkeit der Umstellung auf alternative Technologien gelegt.

**Kapitel 4:**
**Infrastruktur und Logistik: Vorbereitungen für den Wandel**
Die erfolgreiche Einführung von alternativen Antriebssystemen erfordert erhebliche Veränderungen in den Treibstofflieferketten und -infrastruktur. Dieses Kapitel evaluiert den aktuellen Stand der Kraftstoff-infrastruktur entlang der Donau, insbesondere das Bunkern für traditionelle Kraftstoffe wie Diesel. Anschließend werden die infrastrukturellen Anforderungen für Biokraftstoffe, Wasserstoff, Methanol und andere Alternativen begutachtet und mögliche Strategien für die Vorbereitung der Donau auf diese neuen Kraftstoffe.

**Kapitel 5:**
**Vergleich von alternativen Antriebssystemen**
Dieses Kapitel vergleicht die alternativen Antriebssysteme, die bereits erwähnt wurden anhand von Schlüsselfaktoren wie Kosten, Emissionen, Skalierbarkeit und Infrastrukturbedarf. Das Ziel ist es, ein klares Verständnis für die Vorteile und Grenzen der einzelnen Technologien zu geben und wie sie in das Binnenwasserstraßensystem der Donau integriert werden können.

**Kapitel 6:**
**Schlussfolgerungen und Ausblick: Reflexionen über die weitere Reise**
Im letzten Kapitel reflektiert der Bericht die wichtigsten Schlussfolgerungen und blickt in die Zukunft der BS. Es unterstreicht die Notwendigkeit von kontinuierlicher Innovation und Zusammenarbeit zur Erreichung der ehrgeizigen Dekarbonisierungsziele des Sektors, erkennt gleichzeitig jedoch die vorliegenden Herausforderungen an.

# 2 Aktuelle Antriebssysteme: Bewertung der vorherrschenden Antriebssysteme

Die Grundlage für jeden Übergang zu alternativen Antriebssystemen muss mit einem gründlichen Verständnis der gegenwärtigen Landschaft beginnen. In diesem Kapitel wird das vorherrschende Antriebssystem bewertet, das derzeit in der Güterschifffahrt auf der Donau eingesetzt wird: Diesel. Durch die Konzentration auf Dieselmotoren und die damit verbundenen Umweltauswirkungen wird eine Ausgangsbasis geschaffen, an der zukünftige Verbesserungen gemessen werden können.

In diesem Kapitel werden die Voraussetzungen für die Analyse alternativer Antriebstechnologien geschaffen, indem die die geschätzten Auswirkungen der bestehenden Diesel-Dominanz analysiert werden, um die Dringlichkeit eines nachhaltigen Wandels zu verstehen.

## 2.1 Donau-Flotte: Zahlen

Basierend auf den Informationen der Statistik der Donaukommission[1] wird hier ein Überblick über die Binnenschifffahrtsflotte auf der Donau gegeben, einschließlich der Unterscheidung zwischen selbstfahrenden und nicht selbstfahrenden Schiffen:

Die Donauflotte besteht aus insgesamt rund 3.500 Schiffen[2]:
Diese lassen sich wie folgt aufschlüsseln:

- Etwa 2.652 Trockengüterschiffe
- 204 Flüssigladungsschiffe
- 642 Schubschiffe und Schlepper

Ein wesentliches Merkmal der Donauflotte ist die Aufteilung zwischen selbstfahrenden und nicht selbstfahrenden Schiffen[3]:

[1] Die Donaukommissionen aktualisieren derzeit die Statistiken und die Methodik (Oktober 2024).
[2] Web: https://navigation.danube-region.eu/working-groups/wg-3-fleet-modernisation
[3] Dies steht in deutlichem Gegensatz zur Rheinflotte, bei der etwa 78 % der Schiffe mit Eigenantrieb ausgestattet sind.

- Schiffe mit Eigenantrieb: etwa 480 Schiffe (18% der Flotte)
- Schiffe ohne eigenen Antrieb (Schleppkähne): etwa 2.376 Schiffe (82% der Flotte)[4]

Die Donauflotte zeichnet sich durch mehrere charakteristische Merkmale aus. Im Vergleich zur Rheinschifffahrt weist sie ein relativ hohes Durchschnittsalter auf. In den vergangenen 20 Jahren wurden nur wenige neue Schiffe auf der Donau in Betrieb genommen. So sind beispielsweise rund 70 % der Schubschiffe älter als 40 Jahre. Auch die lange Lebensdauer der Schiffsmotoren von etwa 15 bis 20 Jahren trägt dazu bei, dass neue Antriebstechnologien nur langsam Einzug in die Flotte halten.

Der Anteil der selbstfahrenden Schiffe nimmt allmählich zu. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bestehende Binnenschiffe ausgemustert und durch gebrauchte, ursprünglich für die Rheinschifffahrt konzipierte Schiffe ersetzt werden. Die zunehmende Verlagerung hin zu Schiffen mit Eigenantrieb sowie die langsame, aber stetige Einführung innovativer Technologien deuten auf eine schrittweise Anpassung der Flotte an veränderte wirtschaftliche und ökologische Anforderungen hin. Die Modernisierung der Flotte und die Umsetzung von Maßnahmen zur Dekarbonisierung („Greening“) sind bislang jedoch nur in begrenztem Umfang erfolgt.

## 2.2 Schiffstypen: Operative Profile pro Strecke

Der Donaufluss, eine der wichtigsten Wasserstraßen Europas, unterstützt eine vielfältige Flotte von Schiffen, die unter einzigartigen Bedingungen operieren. Vom selbstfahrenden Frachtschiff bis zu Schubverbänden navigieren die Schiffe durch Schleusen, Häfen und unterschiedliche Wasserstände. Ihr Betriebsprofil wird von Faktoren wie der Art der Ladung, saisonalen Veränderungen und infrastrukturellen Herausforderungen beeinflusst. Das Verständnis dieser Profile ist wichtig für die Optimierung der Transporteffizienz, der Schiffskonstruktion und die Berücksichtigung von Umweltbelangen.

Die Schifffahrt auf der Donau ist aufgrund diverser Charakteristika entlang ihrer 2.850km langen Strecke eine Herausforderung.

Engpässe, wie Fahrwassertiefen unter 2,5 Metern und saisonale Schwankungen schränken den Tiefgang der Schiffe ein und reduzieren die schiffbaren Tage. Die Infrastruktur des Flusses mit 75 Häfen und zahlreichen Schleusen hilft diese Herausforderungen zu bewältigen, obwohl die Schiffe oft flexible Konfigurationen benötigen, um die Effizienz ganzjährig zu bewahren.

Die Donau wird traditionell in drei Abschnitte unterteilt:

- Obere Donau: Vom Schwarzwald bis zur ungarischen Torschlucht zeichnet sich dieser Abschnitt durch ein schmales, felsiges Flussbett und mäandrierende Kanäle aus, die von alpinen Nebenflüssen beeinflusst werden.
- Mittlere Donau: Sich bis zur Schlucht des Eisernen Tors erstreckend, hat die mittlere Donau ein breites, flaches Flussbett und schwankende Tiefen, durchquert Ebenen und erhält wichtige Nebenflüsse.
- Untere Donau: Vom Eisernen Tor bis zum Schwarzen Meer fließt dieser breite, langsam fließende Fluss durch Ebenen und trägt zum Donaudelta bei.

[4] Web: https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/114634710/s12544_022_00526_5.pdf

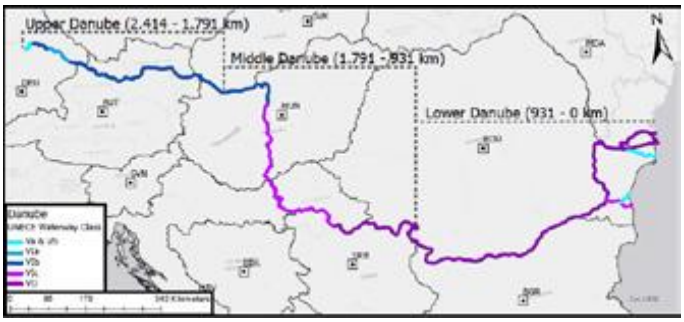



*Bild 1: Die Donau wird traditionell in drei Abschnitte unterteilt*

Die Donauflotte umfasst eine Vielzahl von Schiffstypen, insbesondere größere Güterschiffe und Schubschiffe, die für den effizienten Transport von Gütern unerlässlich sind, wobei Schubverbände die häufigste Form sind.

Diese bestehen aus Schubschiffen und nicht motorisierten Lastkähnen, die auf Manövrierfähigkeit optimiert sind. Schiffe mit Eigenantrieb, wie Motorgüterschiffe und Tanker sind zwar weniger verbreitet, aber dennoch von Bedeutung. Schleusengrößen begrenzen die Schiffsabmessungen.
Die Donauflotte wird von einer Vielzahl von Unternehmen betrieben: Große Betreiber verschiffen hauptsächlich trockenes Massengut im Rahmen langfristiger Verträge und setzen häufig Bargenkonvois ein. Kleinere Unternehmen bedienen Nischenmärkte und kurzfristige Verträge. Donautrockenladungsschiffe transportieren typischerweise Güter wie Stahl, Getreide und Erz, mit Kapazitäten zwischen 1.000 und 2.000 Tonnen.
Tanker, die hauptsächlich gefährliche Stoffe transportieren, haben ein Fassungsvermögen von etwa 2.000 Tonnen. Der Transport von Containern ist weniger verbreitet, kommt aber gelegentlich vor. Metallprodukte dominieren den Transport auf der Donau, gefolgt von landwirtschaftlichen Gütern. Rund 75 % des gesamten Gesamttransports finden auf der unteren Donau statt, wobei die rumänische Flotte eine wichtige Rolle spielt, insbesondere bei der Beförderung von Trockenfracht.

Für die gesamte schiffbare Donau zwischen Kelheim (Deutschland) und dem Schwarzen Meer, einschließlich des Donau-Schwarzmeer-Kanals und Sulina-Kanals, liegt das Fracht-Transportvolumen typischerweise zwischen 34 und 40 Millionen Tonnen pro Jahr[5]. Umweltfaktoren, wie z. B. der Wasserstand, beeinflussen das Transportvolumen erheblich: Während beispielsweise 2019 auf dem österreichischen Teil der Donau 8,5 Millionen Tonnen transportiert wurden, sank diese Zahl 2023 auf 6,0 Millionen[6].

Die Flotte entwickelt sich ständig weiter und reagiert sowohl auf betriebliche Herausforderungen als auch auf Umweltanforderungen. Es gibt weiterhin zwei Hauptprofile für den Schiffsbetrieb, die basierend auf Größe, Antriebsleistung, der beförderten Ladung und der Strecke, auf der sie fahren kategorisiert werden können:

1. **Schubschiffe**, die für die Bewegung der Schleppkähne zuständig sind, haben unterschiedliche Antriebsleistungen, wobei größere Konvois Schiffe mit mehr als 2.000 kW benötigen, um schwere Lasten wie Baumaterialien, landwirtschaftliche Produkte und Erdöl zu transportieren. Betrieb auf der unteren und mittleren Donau.

2. **Motorgüterschiffe**, oft über 110 Meter lang, transportieren trockene und flüssige Güter in großen Mengen, die für den Langstreckentransport entscheidend sind. Ausgestattet mit leistungsstarken Motoren, bewältigen sie die schwierigen Bedingungen der Donau, wie beispielsweise schwankende Wasserstände. Obwohl weniger verbreitet, sind auch Passagierschiffe im Einsatz, welche die Tourismusindustrie der Region unterstützen.

[5] Web: https://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om23_II_en.pdf
[6] Web: https://www.viadonau.org/fileadmin/user_upload/Annual_Report_on_Danube_Navigation_2023.pdf

## 2.3 Status quo der Umweltauswirkungen (repräsentative Fahrten basierend auf Daten von PROMINENT)

Nachdem nun die Anzahl und die Schiffstypen ermittelt wurden, lohnt sich der Versuch einer Abschätzung der Auswirkungen ihrer Antriebssysteme, allen voran der Dieselmotoren. Um dies zu erreichen müssen mehrere Zwischenschritte und Annahmen gemacht werden. Glücklicherweise ist auf diesem Gebiet bereits eine beträchtliche Menge an Forschung betrieben worden, die wichtige Annahmen und wichtige Standardwerte zur Verfügung stellen, die für genaue Schätzungen verwendet können.

Durch die Nutzung dieser Forschungsergebnisse können die Umweltauswirkungen von Dieselmotoren auf Binnenschiffe unter Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch, Emissionsfaktoren und Betriebseigenschaften modelliert werden. Dies ermöglicht es, fundierte Annahmen über den Kraftstoffverbrauch - und damit über CO2-Emissionen – treffen zu können.

Ein für diese Studie wichtiger Primärdatensatz stammt aus dem europäischen Forschungsprojekt PROMINENT[7], das umfangreiche Daten über den Binnenschifffahrtstransport, Schiffstypen, Betriebsstunden und die an Bord des Schiffes eingebaute Leistung von repräsentativen Fahrten im Donauraum bietet. PROMINENT gilt weithin als eine der detailliertesten und strukturiertesten Informationsquellen für die europäischen Binnenwasserstraßen, einschließlich der Donau. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass der in dieser Analyse verwendete Datensatz aus dem Jahr 2013 stammt, was gewisse Einschränkungen mit sich bringt[8].

Dieser Datensatz sollte als eine grundlegende Referenz betrachtet werden, die einen ersten Eindruck vom „aktuellen“ Stand der Güterschifffahrtsantriebssysteme als theoretisches Maximum gibt. Er bleibt zwar eine wertvolle Datenquelle, es sollten sich die Stakeholder allerdings bewusst sein, dass die aus diesem Datensatz abgeleiteten Erkenntnisse möglicherweise nicht den neuesten Entwicklungen in den Bereichen Technologie, Regulierung oder Industriepraktiken entsprechen.

**Schätzung der Ausgangssituation**

Die folgende Analyse dient als vorläufiger Benchmark für die Bewertung alternativer Antriebssysteme. Die PROMINENT-Daten, die sich auf Daten der Donaukommission aus dem Jahr 2013 beziehen, enthalten detaillierte Informationen über die an Bord des Schiffes eingebaute Leistung pro Schiffsfamilie/Betriebsprofil. Für die repräsentativen Fahrten auf der Donau ist das typischerweise verwendete Schiff:

- Schubkonvois mit 9 Schleppkähnen (4 Schleppkähne für eine Fahrt)
- CEMT Klasse VI
- Betriebsstunden pro Jahr: 4,318
- 2 installierte Motoren
- Gesamtmotorleistung: 2 x 1.000 kW = 2.000 kW

**Einige Hauptmerkmale der Donauflotte**

1. **Schubschiffe:**

- Längen zwischen 20,72 m und 34,66 m
- Breiten von 7,78 m bis 11,04 m
- Motorleistungen von 2 x 300 kW bis 2 x 1.249 kW

[7] https://cordis.europa.eu/project/id/633929/de

[8] Die meisten Fahrten in PROMINENT erstrecken sich nur über zwei oder drei Abschnitte, was zu sehr ausgeprägten Spitzen in den Profilen führt. Diese betrieblichen Profile geben Aufschluss über die Leistungsverteilung der Binnenschiffe während der repräsentativsten Fahrten und damit über die benötigte Leistung für diese Fahrten. Die erstellten Betriebsprofile weisen ebenfalls einige Einschränkungen auf, z. B. standen noch keine guten Geschwindigkeits-Leistungs-Verteilungen für die Donauschubschiffe zur Verfügung.

2. **Schiffe mit Eigenantrieb:**

- Längen von 64,92 m bis 105,04 m
- Breiten von 8,99m bis 11,5m
- Motorleistungen von 383 kW bis 2 x 940 kW
- Nutzlasten von 902 Tonnen bis 2.095 Tonnen

3. **Häufigste Schiffstypen auf der Oberen Donau:**

- Motorgüterschiffe 110m lang (1.150 kW)
- Motorgüterschiffe mit 105 m Länge (950 kW)
- Motorgüterschiffe 80m x 8,2m (600 kW)
- Motorgüterschiffe 85m x 9,5m (750 kW)
- Schubschiffe 57m lang (1.470 kW)

**Kraftstoffverbrauchsrate:**

- Schubkonvois verbrauchen wahrscheinlich etwa 0,25-0,35 Liter Diesel pro kWh im Allgemeinen, auf der Donau nach Expertenmeinung weniger → 0,15 Liter pro kWh
- Motorgüterschiffe verbrauchen wahrscheinlich etwa 0,20-0,30 Liter Diesel pro kWh → 0,25 kWh

Basierend auf den Statistiken der Donaukommission und der ZKR (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt), die auf ihren Websites[9] zur Verfügung gestellt werden, gibt diese Tabelle einen Überblick über die Flotte der auf der Donau verkehrenden Schiffe.

Diese Tabelle basiert auf den folgenden Informationen:

- Es gab 409 Trockengüterschiffe mit Eigenantrieb auf der Donau.
- Die Schubboote und Schleppboote ergaben zusammen 642 (400 Schubschiffe und 242 Schlepper).
- Es gab ungefähr 2.100 nicht angetriebene Güterschleppkähne in der Donauflotte.

Es ist wichtig anzumerken, dass diese Statistiken aus dem Jahr 2017 stammen, welche die aktuellsten Daten sind, die in den zur Verfügung stehenden Suchergebnissen verwendbar waren. Die Zusammensetzung der Flotte kann sich seither leicht verändert haben, aber sie gibt einen guten Überblick über die Struktur der Donauflotte. Jetzt werden die Betriebszeit und die durchschnittliche an Bord des Schiffes eingebaute Leistung pro Schiffstyp, basierend auf den PROMINENT-Daten, ergänzt.

| Schiffstyp | Anzahl an Schiffen | Betriebsstunden | Durchschnittliche Leistung (kW) |
|---|---|---|---|
| **Motorgüterschiffe** | 409 | 4,318 | 1,242 |
| **Schub- und Schleppschiffe** | 642 | 4,318 | 1,153 |

| Schiffstyp | Motorgüterschiffe | Schub- und Schleppschiffe |
|---|---|---|
| **Schiffsanzahl** | 409 | 642 |
| **Betriebsstunden** | 4.318 | 4.318 |
| **Betriebsstunden gesamt** | 1.766.062 | 2.772.156 |
| **Durchschnittl. Leistung (kWh)** | 1.242 | 1.153 |
| **Betriebsstunden x Durschnittl. Leistung (kWh)** | 2.193.449.004 | 3.196.295.868 |
| **50% Auslastung (kWh)[10]** | 1.096.724,502 | 1.096.724.502 |

[9] Web: https://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om21_II_en.pdf

[10] Durchschnittlicher Energieverbrauch auf der Donau: 50%, Zahl basiert auf Expertenmeinung

| | | |
|---|---|---|
| **Kraftstoffverbrauch pro kWh (Liter)** | 0,25 | 0,15 |
| **Kraftstoffverbrauch gesamt (Liter)** | 274.181.125 | 239.722.190 |
| **CO2 Emissionen (kg)** | 860.928.734 | 752.727.677 |

**Anmerkungen zu den Berechnungen:**

**1. Für Motorgüterschiffe:**

Die durchschnittliche Leistung pro Schiffstyp wird berechnet aus der Gesamtleistung geteilt durch die Anzahl der Schiffe*

- Motorschiffe Trockenladung ≥ 110m Länge: 1.742 kW
- Motorschiffe mit flüssiger Ladung ≥ 110 m Länge: 1.780 kW
- Motorschiffe Trockenfracht 80-109m Länge: 764 kW
- Motorschiffe Flüssigfracht 80-109m Länge: 954 kW
- Motorschiffe < 80 m. Länge: 302 kW

Wenn man den Durchschnitt dieser Werte nimmt:
(1.742 + 1.780 + 764 + 954 + 302) / 5 ≈ 1.242 kW

**2. Für Schubboote und Schlepper:**

Die durchschnittliche Leistung von 1.153 kW errechnet sich aus:

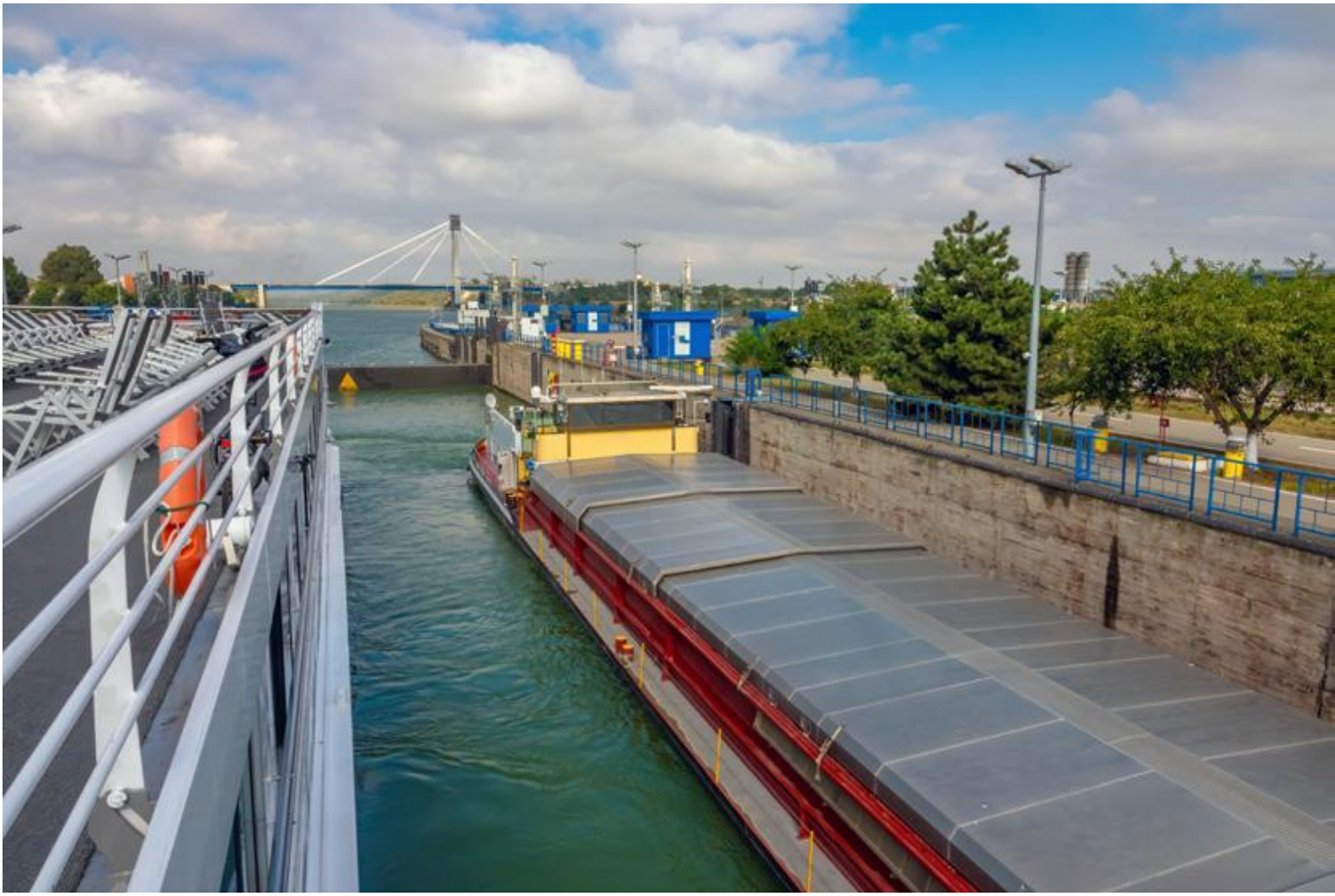
- Schubschiff < 500 kW: 247 kW
- Schubschiff 500-2.000 kW: 847 kW
- Schubschiff ≥ 2.000 kW: 3.458 kW

Aus diesen Werten wird ein Durchschnitt gebildet:
(247 + 847 + 3.458) / 3 ≈ 1.153 kW

Dies sind ungefähre Durchschnittswerte auf der Grundlage der verfügbaren Daten. Die tatsächliche Durchschnittsleistung kann je nach der spezifischen Verteilung der Schiffe innerhalb der einzelnen Kategorien variieren. Die gesamten $CO_2$-Emissionen der Schiffe belaufen sich nach den vorgelegten Daten auf 1.613.656 Tonnen $CO_2$[11].

*Danube Commission, 2013 - https://www.prominent-iwt.eu/wp-content/uploads/2015/06/2015_09_23_PROMINENT_D1.1-List-of-operational-profiles-and-fleet-families-V2.pdf

[11] Im Vergleich dazu: Die Sektoren Verkehr, Gebäude und Heizung, Strom und Abfall setzen in Wien schätzungsweise 7,8 Millionen Tonnen Kohlendioxid
pro Jahr frei. Das bedeutet, dass die Gesamtemissionen der Donauflotte als theoretisches Maximum etwa weniger als 20% der Wiener
jährlichen Emissionen entsprechen, siehe https://www.climate-kic.org/success-stories/viennas-journey-to-carbon-neutrality



# 3 Alternative Antriebstechnologien: Neue Horizonte

Da die Schifffahrtsindustrie bestrebt ist, ihre Umweltauswirkungen zu verringern, gewinnen alternative Antriebstechnologien zunehmend an Bedeutung. In diesem Kapitel werden mehrere vielversprechende Alternativen untersucht, darunter Biokraftstoffe, Elektroantriebe, Wasserstoff, Methanol, Ammoniak und hybride Systeme.

Jede dieser Technologien bietet spezifische Möglichkeiten und Herausforderungen. Durch die Untersuchung ihres Potenzials wollen wir einen Einblick in die Machbarkeit dieser Alternativen und ihre Anwendbarkeit für die Güterschifffahrt auf der Donau geben. Diese Erkundung wird das Rückgrat unserer Diskussion über den Übergang zu umweltfreundlicheren Antriebssystemen bilden.

## 3.1 Biokraftstoffe

Biokraftstoffe werden zunehmend als eine wichtige Lösung zur Reduzierung der Emissionen in der BS anerkannt. Kraftstoffe wie Hydriertes Pflanzenöl (HVO) und flüssiges Biomethan (LBM) sind besonders gut geeignet, um zur kurz- bis mittelfristigen Emissionsreduzierung beizutragen. Diese Biokraftstoffe bieten einen praktischen Vorteil, da sie mit bestehenden Schiffsmotoren und Bunkeranlagen kompatibel sind, was einen schnelleren Übergang zu saubereren Energiequellen ohne signifikante Kapitalinvestitionen in neue Technologien bedeutet.

Im Gegensatz zu anderen emissionsarmen Alternativen, wie Wasserstoff-Brennstoffzellen oder

batterieelektrische Antrieben, die erhebliche Änderungen der Infrastruktur und höhere Betriebskosten erfordern, lassen sich Biokraftstoffe relativ einfach in das bestehende System integrieren („drop-in“). Dies macht sie zu einer realisierbaren Option für die BS, um kurzfristig eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

Es wird erwartet, dass sich die Technologien für saubere Verbrennungsmotoren in den kommenden Jahrzehnten weiterentwickeln werden, wobei Biokraftstoffe bei diesem Übergang eine entscheidende Rolle spielen. Während das langfristige Ziel die Umstellung auf emissionsarme Technologien ist, bilden Biokraftstoffe eine wichtige Brücke, indem sie eine emissionsärmere Option bieten, die bereits jetzt eingesetzt werden kann. Allerdings werden die Kosten und die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen, insbesondere solche, die aus nachhaltigen Rohstoffen gewonnen werden, kritisch sein für das Ausmaß der Einführung im gesamten Sektor.

In dieser Analyse werden die technische Machbarkeit, wirtschaftliche Faktoren, Umweltmerkmale und die sozialen Folgen der Einführung von Biokraftstoffen in der BS bewertet, wobei der Schwerpunkt auf den wichtigsten Herausforderungen und Chancen liegt.

### 3.1.1 Technische Machbarkeit

Biokraftstoffe, insbesondere hydriertes Pflanzenöl (HVO), erweisen sich als vielversprechende Lösung zur Emissionsreduzierung in der BS. HVO, ein Biokraftstoff der zweiten Generation, kann direkt in Dieselmotoren verwendet werden und bietet eine praktische Möglichkeit Emissionen ohne wesentliche Änderungen an den Schiffen zu reduzieren. Dieser „Drop-in“-Kraftstoff wird als kohlenstoffneutral eingestuft, weil das bei der Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid durch das $CO_2$ ausgeglichen wird, welches die Rohstoffpflanzen während des Wachstums absorbieren, was ihn zu einer nachhaltigen Alternative zu fossilen Brennstoffen macht.

Einer der Hauptvorteile von Biokraftstoffen ist ihre Kompatibilität mit bestehenden Motoren und Infrastrukturen, was eine relativ einfache Integration in die bestehende Flotte bedeutet. Dies steht im Gegensatz zu emissionsarmen Alternativen, wie Wasserstoff und Ammoniak, die umfangreiche Anpassungen an Schiffen und Hafenanlagen erfordern. Biokraftstoffe bieten eine sofortige Lösung zur Emissionsreduzierung, ohne hohe Vorlaufkosten für Umrüstungen oder die Entwicklung neuer Technologien.

Es gibt jedoch technische Faktoren in Bezug auf Biokraftstoffe zu berücksichtigen, insbesondere zu FAME (Fatty Acid Methyl Ester). Diese Kraftstoffe erfordern ein sorgfältiges Management, um potenzielle Probleme für die Motorensysteme zu vermeiden. Strenge Qualitätsstandards, die Beachtung der Lagerbedingungen und ein angemessenes Temperaturmanagement sind notwendig, um den erfolgreichen Einsatz von Biokraftstoffen in der BS zu gewährleisten. Zusätzliche Tests werden derzeit (Sommer 2024), z.B. zur Wintertauglichkeit des Kraftstoffs durchgeführt.[12]

Verordnungen und Motorenhersteller erlauben bis zu 37% Biokraftstoffanteil in den meisten Dieselmotoren, bestehend aus 7% FAME und ca. 30% HVO, gemischt mit herkömmlichem Diesel. Motoren der Stufe V können potenziell höhere Mischungen bis zu 100 % FAME oder HVO verwenden, sofern in der Typenzulassung inkludiert. Es ist allerdings unsicher, ob die Hersteller dies aufgrund der begrenzten Marktgröße verfolgen werden[13]. Die technischen Risiken beziehen sich hauptsächlich auf FAME-Mischungen und Lagerungs-/Versorgungssysteme auf Schiffen. Die Risiken werden als akzeptabel angesehen, erfordern aber eine gute Wartungspraxis.

[12] Web: https://binnenvaartkrant.nl/kbn-goede-hoop-op-probleemloze-bijmenging-fame-winterkwaliteit
[13] Web: https://publications.tno.nl/publication/34637419/wHTZ8b/TNO-2020-R11455.pdf

### 3.1.2 Wirtschaftliche Analyse

Biokraftstoffe bieten eine kosteneffiziente Lösung zur kurzfristigen Emissionsreduzierung, insbesondere aufgrund ihrer Kompatibilität mit der bestehenden Infrastruktur. Diese Kompatibilität verringert den Bedarf an erheblichen Kapitalinvestitionen, was Biokraftstoffe zu einer attraktiven Option für Betreiber macht, die zeitnahe Emissionsreduzierungen anstreben.

Jedoch bleiben die Kosten und die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen, insbesondere von solchen, die aus nachhaltigen Rohstoffen gewonnen werden, weiterhin eine entscheidende Herausforderung. Die Produktion von Biokraftstoffen wird durch die Verfügbarkeit von Rohstoffen beeinflusst, die begrenzt sein kann. Die nachhaltige Produktion von Biokraftstoffen erfordert einen sorgfältigen Umgang mit den Ressourcen, und die Produktionskosten können je nach Rohstoffverfügbarkeit und Marktnachfrage schwanken.
Im Vergleich zu Alternativen wie Ammoniak und Wasserstoff, sind Biokraftstoffe derzeit erschwinglicher und können schneller eingesetzt werden, sodass sie eine Zwischenlösung darstellen, während sich emissionsarme Technologien noch in der Entwicklung befinden. Langfristig könnte jedoch die breite Einführung von Biokraftstoffen durch Versorgungsengpässe und die Notwendigkeit kontinuierlicher Investitionen in nachhaltige Rohstoffproduktion eingeschränkt werden.

Die Nachfrage nach Biokraftstoffen könnte erheblich steigen, insbesondere in der internationalen Schifffahrt und im Luftverkehr, und könnte bei ehrgeizigen Szenarien 248 PJ bis 2030 erreichen. Der Biokraftstoffbedarf des Binnenschifffahrtssektors (3-5 PJ) ist im Vergleich zur Gesamtnachfrage relativ klein, was bedeutet, dass der Wettbewerb mit anderen Sektoren stark ist. Die Kosten für Biokraftstoff sind erheblich höher als bei herkömmlichem Diesel und können die Kraftstoffkosten für die BS um 9-24 %, je nach Szenario und verwendetem Rohmaterial steigern.[14]

### 3.1.3 Ökologische Merkmale: Emissionen und Nachhaltigkeit

Biokraftstoffe als Alternative zu herkömmlichem Diesel in der BS bieten mehrere Vorteile in Bezug auf die Emissionen, insbesondere wenn sie aus nachhaltigen Quellen hergestellt werden. Biokraftstoffe, wie Biodiesel oder hydriertes Pflanzenöl (HVO), gelten als kohlenstoffneutral, da das bei der Verbrennung freigesetzte $CO_2$ durch jenes $CO_2$ ausgeglichen wird, das während des Wachstums des Rohstoffs absorbiert wird.

Während Biokraftstoffe die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Brennstoffen deutlich reduzieren, sind sie nicht völlig emissionsfrei. Biokraftstoffe stoßen weiterhin Schadstoffe aus, darunter Stickoxide (NOx) und Feinstaub (PM), wenn auch in der Regel in geringerem Umfang als Diesel. Das macht Biokraftstoffe zu einer umweltfreundlicheren Option, wenn auch nicht so sauber wie Wasserstoff oder Ammoniak, die bei richtiger Handhabung potenziell emissionsfrei sein können.

### 3.1.4 Soziale Konsequenzen

Die Einführung von Biokraftstoffen in der BS hat erhebliche soziale Auswirkungen. Einer der wichtigsten Vorteile ist die Möglichkeit Emissionen zu reduzieren, ohne, dass eine Umschulung der Arbeitskräfte oder Investitionen in neue Qualifikationen notwendig sind, da Biokraftstoffe mit bestehenden Motoren verwendet werden können. Dies erleichtert den Übergang zu saubereren Kraftstoffen und reduziert die Unterbrechung der Beschäftigung im Sektor.

Um die Wirkung von Biokraftstoffen zu maximieren, sind jedoch unterstützende politische Maßnahmen und Anreize unerlässlich. Ein europaweiter einheitlicher Rechtsrahmen wird helfen gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, um so eine breitere Einführung zu ermöglichen.

[14] Web: https://publications.tno.nl/publication/34637419/wHTZ8b/TNO-2020-R11455.pdf

Außerdem muss sichergestellt werden, dass die nachhaltige Produktion von Biokraftstoffen hochskaliert wird. Des Weiteren sind die Motorenzertifizierung und ein verstärktes Bewusstsein der Nutzer für die erfolgreiche Integration von Biokraftstoffen in den Binnenschifffahrtssektor notwendig.

Mit der Beschaffung von Biokraftstoffen gehen auch umfassendere soziale Erwägungen einher. Die Verwendung von Nutzpflanzen zur Kraftstoffproduktion wirft ethische Bedenken auf. Es muss auf die Nachhaltigkeit der Rohstoffbeschaffung geachtet werden, um negative soziale Auswirkungen, wie steigende Lebensmittelpreise oder Landnutzungskonflikte, zu vermeiden.

| *Charakteristika* | *Biokraftstoffe* | *Diesel* |
|---|---|---|
| ***Treibhausgas-emissionen*** | Niedriger als Diesel; $CO_2$-Emissionen werden oft ausgeglichen durch die Absorption während dem Wachsen der Biomasse | Hoch ($CO_2$, Methan, Stickstoffoxide, etc.) |
| ***Luftverschmutzung*** | Niedriger als Diesel, aber Emission von Feinstaub und $NO_x$ dennoch möglich | Hoch ($NO_x$, Feinstaub, Schwefeloxide) |
| ***Energiequelle*** | Erneuerbar (aus Pflanzen, Algen, oder Abfallstoffen) | Fossil (nicht-erneuerbar) |
| ***Effizienz*** | Ähnlich zu Diesel in Verbrennungsmotoren, höher in fortgeschrittenen Biokraftstoffanwendungen | Niedrige Effizienz in internen Verbrennungsmotoren (25-30%) |
| ***Produktionsaus-wirkungen*** | Auswirkungen variieren; niedriger als fossile Kraftstoffe, aber Landnutzung und Pflanzenproduktion kann umwelttechnische Auswirkungen haben | Hohe Auswirkungen, umfasst Extraktion, Veredelung und Distribution |
| ***Wassernutzung*** | Hoch (Bewässerung und Aufbereitung kann signifikante Wassermengen benötigen) | Signifikant (In Extraktion, Veredelung, Kühlungsprozessen) |
| ***Lärmverschmutzung*** | Ähnlich zu Diesel in Verbrennungsmotoren | Hoch (Dieselmotoren sind laut) |
| ***Toxizität*** | Weniger toxisch als Diesel, aber kann abhängig von der Produktionsmethode und verwendetem Rohstoff variieren | Toxisch (Dieseldämpfe enthalten Karzinogene) |
| ***Lebenszyklus Emissionen*** | Niedriger als Diesel, aber hängt von der Produktionsmethode und von Rohstoff ab | Hoch (Emissionen von Extraktion zu End-Anwendung) |
| ***Ressourcen-verfügbarkeit*** | Erneuerbar, aber limitiert durch Land, Wasser und Rohstoffverfügbarkeit | Endlich (Limitierte fossile Kraftstoffreserven) |

### 3.1.5 Pilotprojekte

In ganz Europa ist eine Reihe von innovativen Pilotprojekten entstanden, die sich auf die Verwendung von Biokraftstoffen zur Dekarbonisierung der BS fokussieren. Diese Projekte untersuchen das Potenzial biobasierter Kraftstoffe wie HVO (Hydriertes Pflanzenöl) und FAME (Fettsäuremethylester). Sie unterscheiden sich in Umfang und Reichweite, aber haben allesamt die gemeinsamen Ziele Nachhaltigkeit zu fördern, Kraftstoffeffizienz zu verbessern und den $CO_2$-Fußabdruck von Binnenschiffen zu verringern. Im

Folgenden finden Sie einen detaillierten Blick auf einige der führenden Biokraftstoff-Pilotprojekte.

### HGK-Schifffahrt HVO100-Pilot

**Jahr**: 2024
**Überblick**: HGK Shipping, Europas größtes Binnenschifffahrtsunternehmen, führt ein Pilotprojekt mit HVO100 Biokraftstoff in ihrer Flotte in Deutschland durch. Der Kraftstoff erfordert keine technischen Änderungen an den Motoren, auch nicht bei älteren Schiffen, und bietet eine bis zu 90-prozentige Reduzierung der CO2-Emissionen. Dieses Projekt hebt die Machbarkeit von HVO als kurzfristige Lösung für die Dekarbonisierung der BS bei gleichzeitiger Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen hervor.15 Dieses Projekt zeigt die unmittelbaren Vorteile von HVO100 und liefert eine Blaupause für den möglichen Einsatz auf der Donau. Allerdings fordern private Parteien Subventionen, um den Zeitraum zu überbrücken bis Mechanismen zur Abfederung der zusätzlichen Kosten implementiert sind.

### Royal Koopmans HVO100 Barge Projekt

**Jahr:** 2024
**Überblick:** In einem gemeinsamen Projekt haben NPRC und Royal Koopmans die erste Barge mit Nedertarwe Weizen mit 100 % HVO-Biokraftstoff transportiert. Diese Reise, von Utrecht nach Rotterdam, demonstrierte das Potenzial von HVO zur Dekarbonisierung der BS ohne Motorenanpassungen. Dieses Projekt stellte einen bedeutenden Schritt zur Reduzierung der Emissionen in der niederländischen BS dar und dient als Modell für den Einsatz von HVO in anderen Regionen.[16]

### VT-Gruppe mit FAME17

**Jahr:** 2023
**Überblick:** Die VT-Gruppe arbeitet mit der FinCo-Gruppe zusammen, um 100% FAME-Biodiesel auf dem Binnenschiff MTS Vlissingen zu testen. Über einen Zeitraum von neun Monaten zeigte das Pilotprojekt bis zu 89% an CO2-Reduktion mit Biodiesel aus tierischen Fetten und Altspeiseöl mit minimalen technischen Anpassungen. Beide Unternehmen sammelten wertvolle Betriebsdaten, ohne, dass während des Tests nennenswerte technische Probleme auftraten. Nach diesem Erfolg plant die VT-Gruppe die Einführung von FAME auf anderen Schiffen, beginnend mit dem größten Bunkerschiff der Welt, der MTS Vorstenbosch.

### MS “Westenwind, Kühne+Nagel Euroshipping, Regensburg.

Die MS Westenwind fährt seit Mai 2024 nach einer Hauptmaschinenüberholung mit HVO100. Es ist bekannt als das erste deutsche Binnenschiff, das seine Ladung aus der Region Amsterdam-Rotterdam-Antwerpen (ARA) Region nach Österreich und umgekehrt transportiert. Durch den vollständigen HVO100-Betrieb wird eine Reduzierung des Kohlenstoff-Fußabdrucks um bis zu 90% erreicht.[18]

Diese Projekte sind ein starker Beweis für die Skalierbarkeit und Anwendbarkeit von HVO in der BS. Beim Thema FAME bleiben technische Bedenken bestehen. Das „Expertise and Innovation Centre Barging (EICB)[19] weist auf mehrere Bedenken hinsichtlich der Verwendung von FAME in der BS hin. Viele bestehende Motoren sind ohne Anpassungen nicht vollständig mit FAME kompatibel, was zu technischen Problemen und Motorschäden führen kann. Ein weiteres Problem sind die Schwankungen der FAME-Qualität, aufgrund von Unterschieden im Ausgangsmaterial, die sich auf Lagerung und Leistung auswirken. FAME ist auch anfälliger für Oxidation und mikrobiologisches Wachstum, insbesondere in der feuchten Umgebung der Binnenschiffe, was eine ordnungsgemäße Lagerung für die Erhaltung der Kraftstoffqualität

---

[15] https://biofuels-news.com/news/hgk-shipping-welcomes-the-approval-for-hvo100/
[16] https://nprc.eu/royal-koopmans-with-first-nedertarwe-barge-on-hvo100-biofuel/?lang=en
[17] 17 https://vtgroup.nl/nl/productieve-pilot-met-100-fame-voor-de-binnenvaart/
[18] 8 https://www.linkedin.com/posts/daniel-j-j-bell-521b8116a_binnenschifffahrt-binnenvaart-hvo-activity-7192129058728550400-9aiu/
[19] 9 https://www.schuttevaer.nl/nieuws/actueel/2024/09/10/binnenvaart-moet-snel-voldoen-aan-strengere-emissiere-gels/

unerlässlich macht. Strengere Emissionsvorschriften unterstreichen die Notwendigkeit von Anpassungen in diesem Sektor weiterhin.

## 3.2 Elektrischer Antrieb

Elektrische Antriebe werden zunehmend als eine wichtige Lösung für die Zukunft des emissionsarmen Antriebs in der BS angesehen. Diese Systeme, die elektrische Energie in mechanische Bewegung umwandeln, bieten erhebliche Vorteile in Bezug auf den Wirkungsgrad. Sie erreichen oft einen 85%igen Wirkungsgrad gegenüber etwa 40% bei herkömmlichen Dieselmotoren. Diese hohe Effizienz, kombiniert mit der Fähigkeit eine gleichbleibende Leistung unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu erbringen, macht den Elektroantrieb hochgradig anpassungsfähig an verschiedene Schiffstypen und Betriebsanforderungen.

Elektrische Antriebssysteme können durch Batterien, Brennstoffzellen oder Hybridkonfigurationen, die konventionelle Motoren integrieren, angetrieben werden. Batterie-elektrische Systeme sind besonders effektiv für kürzere Strecken, z. B. für Fähren und kleine Ausflugsschiffe, während Hybrid-konfigurationen längere Strecken bedienen können, indem sie elektrischen und herkömmlichen Antrieb kombinieren. Erfolgreiche Implementierungen in großen Häfen wie Rotterdam und Antwerpen haben die Machbarkeit von elektrischen Antrieben für die BS aufgezeigt. Außerdem tragen diese Systeme zur Gesamtenergieeffizienz bei, indem sie Nachfragespitzen in Zeiten hohen Energie-verbrauchs glätten, was sie besonders wertvoll für das Energiemanagement in stark frequentierten Häfen macht.

Da sich der Binnenschifffahrtssektor ständig weiterentwickelt, bietet der elektrische Antrieb eine skalierbare und effiziente Lösung für die Dekarbonisierung der BS und trägt zu einer unmittelbaren Verringerung der Treibhausgasemissionen bei, ohne, dass komplexe Umrüstungen oder infrastrukturelle Veränderungen notwendig sind.

### 3.2.1 Technische Machbarkeit

Elektrische Antriebssysteme, insbesondere batterieelektrische Lösungen, haben sich als technisch realisierbar für ein breites Spektrum von Schiffstypen erwiesen. Der Wirkungsgrad von 85% von Elektromotoren übertrifft die Leistung von Dieselmotoren signifikant, was eine bessere Energienutzung und langfristig niedrigere Betriebskosten ermöglicht. Diese höhere Effizienz bedeutet, dass elektrische Antriebssysteme eine konstante Leistungsabgabe bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen aufrechterhalten, was besonders vorteilhaft für Schiffe ist, die in städtischen oder ökologisch sensiblen Gebieten im Betrieb sind.

Elektrische Antriebssysteme sind besonders geeignet für Schiffe, die auf kurzen Strecken verkehren, wie Flussfähren oder den hafengebundenen Güterverkehr. Hybride Systeme, die einen batterieelektrischen Antrieb mit einem konventionellen Motor kombinieren, bieten die Flexibilität, den Einsatzbereich von Schiffen auf längeren Fahrten zu erweitern, den Kraftstoffverbrauch zu optimieren und die Emissionen zu reduzieren. Darüber hinaus werden laufend technologische Fortschritte erzielt, wie Hochtemperatursupraleiter und optimierte Motorsteuerungssysteme, welche die Leistung und Anpassungsfähigkeit von Elektroantrieben im maritimen Sektor weiter verbessern.

Die breite Einführung von Elektroantrieben in der BS wird jedoch derzeit durch die Energie-speicherkapazität der Batterien und die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur limitiert. Für kurze bis mittlere Reichweiten sind Batteriesysteme ausreichend, aber für Langstreckenschiffe werden erhebliche Fortschritte in der Batterietechnologie oder Hybridlösungen erforderlich sein, um den betrieblichen Anforderungen gerecht zu werden.

### 3.2.2 Ökonomische Analyse

Der Elektroantrieb bietet langfristig wirtschaftliche Vorteile, allen voran durch geringere Kraftstoff- und Wartungskosten. Elektromotoren sind weniger komplex als Verbrennungsmotoren, das bedeutet weniger bewegliche Teile und geringere Wartungsanforderungen. Mit der Zeit können diese Einsparungen die höheren anfänglichen Kapitalkosten ausgleichen, die mit elektrischen Antriebssystemen verbunden sind, insbesondere die Kosten für Batterien. Derzeit bleiben die Batteriekosten eine der größten wirtschaftlichen Herausforderungen für die vollständige Elektrifizierung. Da sich die Batterietechnologie weiterentwickelt und Größenvorteile die Produktionskosten senken, wird sich die Kosteneffizienz des Elektroantriebs allerdings voraussichtlich erheblich verbessern. Fortschritte in der Batterietechnologie - wie eine höhere Energiedichte und schnellere Ladefähigkeit - werden die wirtschaftliche Machbarkeit des elektrischen Antriebs in der BS verbessern.

Für Betreiber werden die Gesamtbetriebskosten für elektrische Antriebsanlagen gegenüber herkömmlichen Dieselmotoren aller Voraussicht nach, zunehmend wettbewerbsfähiger, insbesondere unter Berücksichtigung möglicher staatlicher Anreize für die Einführung von emissionsarmen Technologien.

Zusätzlich kann die Nutzung erneuerbarer Energiequellen zum Antrieb von Elektroschiffen die Betriebskosten senken - insbesondere in Regionen mit günstigem Zugang zu Wind- oder Sonnenenergie. Im Vergleich zu Alternativen wie Wasserstoff oder Ammoniak haben elektrische Antriebssysteme den Vorteil der sofortigen Einsatzmöglichkeit und nutzen die in vielen Regionen vorhandene Infrastruktur. Doch für längere Fahrten werden Hybridsysteme oder künftige Fortschritte im Bereich der Batteriespeicher entscheidend sein, um einen kosteneffizienten Betrieb zu gewährleisten.

### 3.2.3 Ökologische Merkmale: Emissionen und Nachhaltigkeit

Einer der wichtigsten Vorteile des elektrischen Antriebs ist das Potenzial zur Beseitigung direkter Emissionen. Anders als Verbrennungsmotoren produzieren elektrische Antriebe kein CO2, NOx oder Feinstaub während des Betriebs, was sie ideal für den emissionsarmen Transport in ökologisch sensiblen Gebieten wie städtischen Wasserstraßen oder geschützten Ökosystemen macht.

Wenn mit erneuerbaren Energiequellen wie Wind-, Solar- oder Wasserkraft betrieben, kann der elektrische Antrieb einen echten Null-Emissions-Betrieb erreichen. Dies macht ihn zu einer der nachhaltigsten Optionen zur Dekarbonisierung der BS. Die breite Einführung des Elektroantriebs hätte erhebliche Auswirkungen auf die Verbesserung der Luftqualität in den Städten, die Verringerung der Wasserstraßenverschmutzung und die Erfüllung gesetzlicher Vorschriften zur Emissionsminderung.

Die Umweltvorteile des Elektroantriebs sind jedoch eng mit der Stromquelle verbunden. In Regionen, in denen der Strom hauptsächlich aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird, müssen die indirekten Emissionen der Stromerzeugung berücksichtigt werden. Sie sind zwar nichtsdestotrotz niedriger als jene von Diesel oder anderen fossilen Brennstoffen, aber die indirekten Emissionen aus nicht-erneuerbaren Energiequellen können den gesamten Umweltvorteil des Elektroantriebs schmälern. Da Länder zu saubereren Energienetzen übergehen, wird sich die Nachhaltigkeit elektrischer Antriebssysteme verbessern.

### 3.2.4 Soziale Konsequenzen

Die Umstellung auf elektrische Antriebe in der BS hat erhebliche soziale und wirtschaftliche Auswirkungen. Da elektrische Antriebssysteme verbreiteter werden, wird neue Infrastruktur in Form von beispielsweise Ladestationen und Netzausbau erforderlich, wodurch Arbeitsplätze geschaffen und Investitionen in umweltfreundliche Technologien angeregt werden. Hinzu kommt, dass elektrische Antriebssysteme Lärm und Luftverschmutzung reduzieren, was die Lebensqualität der Gemeinden, die in der Nähe stark befahrener Binnenwasserstraßen leben, verbessern kann.

Der Übergang zu elektrischen Antrieben wird jedoch ein gewisses Maß an Umschulung der Besatzungen und des Wartungspersonals erfordern, um elektrische Systeme effektiv zu betreiben und zu warten. Regierungen und Industrie müssen zusammenarbeiten, um Unterstützung und Schulungsprogramme bereitzustellen und einen reibungslosen Übergang zu gewährleisten.
Anreize wie Subventionen oder Steuererleichterungen werden entscheidend sein, um Betreiber zu ermutigen elektrische Antriebe zu adoptieren, insbesondere in Anbetracht der hohen Anfangskosten von Batteriesystemen. Ein einheitlicher rechtlicher Rahmen in ganz Europa, kombiniert mit finanziellen Anreizen, wird dazu beitragen, gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und die breite Einführung zu fördern.

### 3.2.5 Pilotprojekte

#### Port-Liner: Elektrische Güterschiffe

**Jahr**: 2018

- Projektübersicht: Port-Liner entwickelte vollständig elektrische Frachtschiffe mit dem Ziel, die Emissionen in der BS zu reduzieren. Diese Schiffe, angetrieben durch große Batteriepacks, sind für Kurz- und Mittelstreckentransporte in den Niederlanden und Belgien konzipiert.
- Schiffe: Elektrische Güterschiffe mit einer Kapazität für bis zu 280 Container.
- Pilotstandort: Niederlande und Belgien.
- Website: port-liner.com

#### Zero Emission Services (ZES) Projekt

**Jahr**: 2021

- Projektübersicht: ZES hat die „ZESpacks“ vorgestellt, Batteriecontainer, die leicht ausgetauscht werden können, um Binnenschiffe mit Strom zu versorgen. Das Projekt zielt darauf ab, die BS nachhaltiger zu machen, indem es eine flexible, emissionsarme Lösung bietet.
- Schiffe: Alphenaar, das erste Schiff, das ZESpacks verwendet.
- Pilotstandort: Niederlande (Rotterdam, Alphen aan den Rijn).
- Website: zeroemissionservices.nl

### 3.2.6 Fazit

Der elektrische Antrieb ist eine skalierbare und wirksame Lösung zur Verringerung der Emissionen in der BS. Sein hoher Wirkungsgrad in Verbindung mit der Eliminierung von direkten Emissionen macht ihn zu einer entscheidenden Komponente für den Übergang zu emissionsarmem Verkehr. Allerdings muss auf Herausforderungen in Bezug auf Batteriespeicher, Ladeinfrastruktur und Stromquelle eingegangen werden, um das Potenzial zu maximieren.

Der elektrische Antrieb ist zwar bereits für den Kurz- und Mittelstreckenbetrieb geeignet, laufende Fortschritte der Batterietechnologie und der Netzinfrastruktur werden jedoch die Ausweitung auf längere Strecken ermöglichen. Hybridsysteme, die den Elektroantrieb mit konventionellen Motoren kombinieren, werden eine wesentliche Rolle bei der Überbrückung bis zur Machbarkeit der vollständigen Elektrifizierung spielen. Mit der Weiterentwicklung der Technologie wird der Elektroantrieb eine immer wichtigere Lösung für die nachhaltige BS werden.

## 3.3 Wasserstoff

Wasserstoff hat sich als vielversprechender Energieträger etabliert, um die zero-emission Ziele in verschiedenen Sektoren, einschließlich der BS, zu erreichen. Da Länder und Regionen ihre Anstrengungen

zur Verringerung der Treibhausgasemissionen intensivieren, hat das Potenzial von Wasserstoff im maritimen Sektor, insbesondere in der BS und im Kurzstreckenseeverkehr, erheblich an Bedeutung gewonnen. Seit 2019 wurden zahlreiche Pilotprojekte gestartet und Innovationen vorgestellt, um die Machbarkeit von Wasserstoff als nachhaltige Kraftstoffalternative zu erforschen. Dies positioniert ihn als eine entscheidende Komponente zukünftiger Energielösungen in der Schifffahrt.

### 3.3.1 Technische Machbarkeit

Die Wasserstoff-Technologie in der BS ist technisch machbar, wie das in Rotterdam ansässige Unternehmen Future Proof Shipping mit der Einführung der H2 Barge One im Jahr 2023 bewiesen hat, auch wenn diese sich noch im Anfangsstadium befindet. Wasserstoff kann in verschiedenen Formen verwendet werden, z. B. als komprimiertes Gas, flüssig oder als Teil von chemischen Verbindungen wie Ammoniak oder Methanol. Jede Form hat ihre eigenen technischen Aspekte, wie Lagerung, Umschlag und Effizienz der Energieumwandlung. Brennstoffzellen, insbesondere Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEM), werden wegen ihrer Effizienz und der geringen Emissionen bei der Verwendung von Wasserstoff oftmals bevorzugt. Doch die Integration von Wasserstoffsystemen in Schiffe ist mit Herausforderungen, wie Platzmangel für die Brennstofflagerung und der Notwendigkeit einer speziellen Betankungsinfrastruktur, verbunden[20].
Die Entwicklung einer geeigneten Infrastruktur, wie Wasserstoffbunkerstationen und Speicherlösungen an Bord, ist entscheidend für die Überwindung dieser Herausforderungen. Pilotprojekte haben gezeigt, dass wasserstoffbetriebene Schiffe effektiv auf Binnenwasserstraßen eingesetzt werden können, aber die Skalierbarkeit und weitreichende Umsetzung hängen von technologischen Fortschritten und der Entwicklung der Infrastruktur ab.

### 3.3.2 Ökonomische Analyse

Die wirtschaftliche Tragfähigkeit von Wasserstoff für die BS hängt von mehreren Faktoren ab, darunter von den Kosten der Wasserstoffproduktion, Infrastrukturinvestitionen und Betriebskosten. Derzeit wird Wasserstoff, insbesondere grüner Wasserstoff, der aus erneuerbarer Energie hergestellt wird, teurer, als herkömmliche fossile Brennstoffe. Nach Angaben von HyXchange, einem Marktplatz für Wasserstoff, sind die Kosten für grünen Wasserstoff in etwa die gleichen wie für grauen Wasserstoff[21].
Hohe Vorlaufkosten für die Umrüstung von Schiffen oder den Bau neuer wasserstoffbetriebener Schiffe sind ebenfalls wirtschaftliche Hindernisse. Ein Beispiel: Die Umrüstung der H2 Barge One erforderte eine Investition von 6 bis 7 Millionen Euro (2023). Das zweite Wasserstoffprojekt, MS Antonie, erforderte sogar eine Investition von 10 Millionen Euro. Das ist etwa doppelt so viel wie bei einem konventionellen Schiff.

Öffentlich-private Partnerschaften, staatliche Subventionen und langfristige Verträge mit Verladern werden als wesentlich angesehen, um die wirtschaftliche Lücke zu schließen. Die niederländische Regierung (2024) bereitet beispielsweise die Bereitstellung von Subventionen für 18 Wasserstoffschiffe mit einem Budget von 75 Millionen Euro vor. Einigung innerhalb der Wertschöpfungskette über die Standardisierung, z.B. über Druckniveaus, sind unerlässlich, um eine angemessene Wirtschaftlichkeit zu erreichen, die zu niedrigeren Preisen und Marktakzeptanz führen.

Demonstrationsprojekte haben gezeigt, dass mit zunehmender Wasserstoffwirtschaft die Kosten sinken könnten, womit Wasserstoff zu einer wettbewerbsfähigeren Option für die BS werden könnte. Allerdings sind klare Geschäftsmodelle und finanzielle Anreize erforderlich, um Investitionen in Wasserstofftechnologien zu fördern.[22]

---

[20] https://www.eicb.nl/wp-content/uploads/2020/07/2020-07-EICB-Rapport-Waterstof-in-de-binnenvaart-en-short-sea.pdf

[21] https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/hyxchange-variabele-kostprijs-groene-waterstof-komt-dichter-bij-grijze

[22] https://www.inlandports.eu/media/Making%20hydrogen%20a%20success%20for%20Inland%20Ports.pdf

### 3.3.3 Ökologische Merkmale und Emissionen

Wasserstoff bietet erhebliche Vorteile für die Umwelt, vor allem aufgrund des Potenzials keine Emissionen zu verursachen, sofern er aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird. Mit Wasserstoff betriebene Schiffe stoßen kein Kohlendioxid ($CO_2$), Stickoxide (NOx) oder Feinstaub während des Betriebs aus, was die Luftverschmutzung drastisch reduziert und zur Verbesserung der Luftqualität in Regionen beiträgt, die auf Binnenwasserstraßen angewiesen sind. Dies macht Wasserstoff zu einer attraktiven Alternative zu Diesel und anderen fossilen Kraftstoffen, die traditionell in der Schifffahrt verwendet werden.

Allerdings hängen die Umweltauswirkungen von Wasserstoff von seiner Produktionsmethode ab. Während grüner Wasserstoff (welcher durch Elektrolyse mit erneuerbarer Energie hergestellt wird) ideal ist, um Null-Emissionen zu erreichen, bieten andere Formen von Wasserstoff, wie grauer Wasserstoff (welcher aus Erdgas mit $CO_2$-Emissionen hergestellt wird), weniger Umweltvorteile. Daher ist die Ausweitung der Produktion von grünem Wasserstoff für die Maximierung der Umweltvorteile von entscheidender Bedeutung.

| Charakteristika | Wasserstoff | Diesel |
|---|---|---|
| **Treibhausgas-emissionen** | Null (wenn aus erneuerbaren Quellen produziert) | Hoch ($CO_2$, Methan, Stick-stoffoxide, etc.) |
| **Luftverschmutzung** | Keine (wenn reine Wasserstoff-verbrennung oder Brennstoff-zelle) | Hoch ($NO_x$, Feinstaub, Schwefeloxide) |
| **Energiequelle** | Kann erneuerbar sein (z.B. Elektrolyse, die Solar/Windener-gie nutzt) | Fossil (nicht-erneuerbar) |
| **Effizienz** | Hohe Effizienz in Brennstoffzel-len (40-60%) | Niedrige Effizienz in internen Verbrennungsmotoren (25-30%) |
| **Produktions-auswirkungen** | Potenzial für niedrige Auswir-kungen, wenn aus erneuerbaren Energien, aber kann auch hoch sein, wenn produziert aus natür-lichem Gas | Hohe Auswirkungen, um-fasst Extraktion, Veredelung und Distribution |
| **Wassernutzung** | Moderat (bei Elektrolyse) | Signifikant (In Extraktion, Veredelung, Kühlungspro-zessen) |
| **Lärmverschmutzung** | Sehr niedrig (Brennstoffzellen) | Hoch (Dieselmotoren sind laut) |
| **Toxizität** | Nicht-toxisch | Toxisch (Dieseldämpfe ent-halten Karzinogene) |
| **Lebenszyklus Emissionen** | Kann fast null sein, wenn aus er-neuerbaren Energien produziert wird | Hoch (Emissionen von Ex-traktion zu End-Anwendung) |
| **Ressourcen-verfügbarkeit** | Reichlich (wenn produziert aus Wasser oder Biomasse) | Endlich (Limitierte fossile Kraftstoffreserven) |

Aus der Perspektive der Nachhaltigkeit wird Wasserstoff als eine langfristige Lösung angesehen, die zur Energieautonomie beitragen kann und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern kann. Der Einsatz von Wasserstofftechnologien in der BS steht im Einklang mit umfassenderen Nachhaltigkeitszielen, indem umweltfreundlichere Transportmöglichkeiten gefördert werden und die kohlenstoffarme Wirtschaft

unterstützt wird. Die Integration von erneuerbaren Energiequellen in die Wasserstoffproduktion, wie die Nutzung von Solar- oder Windenergie durch Elektrolyse, verbessert das Nachhaltigkeitsprofil des mit Wasserstoff betriebenen Verkehrs.

### 3.3.4 Soziale Konsequenzen

Nachhaltige Wasserstofflösungen beruhen des Weiteren auf dem Konzept der Kreislaufwirtschaft, bei dem Abfälle und Restenergie aus anderen Prozessen zur Herstellung von Wasserstoff genutzt wird. Binnenhäfen, die als multimodale Knotenpunkte fungieren können dabei eine entscheidende Rolle spielen, indem sie Wasserstoff aus überschüssiger erneuerbarer Energie erzeugen und so zu einem nachhaltigeren Energienetz beitragen.
Die Umstellung auf Wasserstoff in der BS hat mehrere soziale Auswirkungen. Ein Positivum einerseits ist, dass die Einführung von Wasserstofftechnologien neue Arbeitsplätze in der Wasserstoffversorgungskette schaffen kann - von der Produktion über den Vertrieb bis zur Wartung der Schiffe. Binnenhäfen, als Knotenpunkte der Wasserstoffwirtschaft, können die lokale wirtschaftliche Entwicklung durch die Ansiedlung neuer Industrien und Investitionen im Zusammenhang mit Wasserstoff fördern.

Allerdings können Herausforderungen wie Sicherheitsbedenken, regulatorische Unsicherheiten und die Notwendigkeit der Umschulung von Arbeitskräften entstehen. Wasserstoff ist ein hochentzündliches Gas, das strenge Sicherheitsprotokolle und Schulungen für das Personal zur Handhabung und Lagerung benötigt. Darüber hinaus kann sich die Umstellung auf Wasserstoff auf bestehende Arbeitsplätze in traditionellen, auf fossilen Brennstoffen basierenden Industrien auswirken. Dies erfordert eine Politik, die einen gerechten Übergang für die betroffenen Arbeitnehmer unterstützt.

### 3.3.5 Pilotprojekte

**Hydrotug: Ein wasserstoffbetriebenes Schleppschiff (Hafen Antwerpen)**
**Jahr**: 2021

- Projektüberblick: Hydrotug ist einer der weltweit ersten wasserstoffbetriebenen Schlepper, der den Hafenbetrieb unterstützt und gleichzeitig Emissionen reduziert. Das Schiff nutzt eine Kombination aus Wasserstoff-Brennstoffzellen und Diesel, was es zu einem Hybridschiff macht.
- Schiff: Hydrotug.
- Pilotstandort: Hafen von Antwerpen, Belgien.
- Website: portofantwerp.com

**H2 Barge 1&2 Projekte**
**Jahr**: 2023

- Projektüberblick: Das Projekt H2 Barge 1 umfasst die Umwandlung eines bestehenden Binnenschiffs in ein wasserstoffbetriebenes Schiff. Das Binnenschiff ist ausgestattet mit
- Wasserstoff-Brennstoffzellen und wird voraussichtlich hauptsächlich auf dem Rhein in der ARA-Region eingesetzt werden, wobei der Schwerpunkt auf dem Transport von Massengütern liegt.
- Schiff: Wasserstoffbetriebenes Binnenschiff.
- Pilotstandort: ARA-Gebiet.
- Website: h2barge.com

**MS Letitia**
**Jahr**: 2024

- Projektüberblick: Das emissionsarme Schiff Letitia, das erste seiner Art in der BS, wird sowohl mit Wasserstoff als auch mit ZES oder bordeigenen Batterien betrieben. Dieses innovative Schiff ist ein wichtiger Schritt in Richtung des emissionsarmen Transports und bietet nachhaltige Alternativen - sowohl für städtische Gebiete als auch für den Schwerlastverkehr auf dem Rhein.

- Schiff: MS Letitia
- Pilotstandort: Rhein

### 3.3.6 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wasserstoff zwar vielversprechend für die Umwandlung der BS in einen emissionsarmen Sektor ist, seine breite Einführung jedoch von der Bewältigung technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Herausforderungen abhängt.

## 3.4 Methanol

Methanol hat sich als vielversprechender alternativer Kraftstoff für die BS erwiesen und trägt zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Schifffahrtsindustrie bei. Aufgrund seiner Vielseitigkeit und der Möglichkeit Methanol aus erneuerbaren Quellen zu produzieren, wird der Stoff als potenzielle Lösung angesehen und bietet einen Weg zu nachhaltigem maritimen Betrieb[23].

### 3.4.1 Technische Umsetzbarkeit

Die Methanoltechnologie ist reif für eine hoch-skalierte Adoption im maritimen Sektor. Vorhandene Motoren können mit relativ geringen Anpassungen für Methanol angepasst werden und neue, methanolbetriebene Schiffe werden bereits gebaut. Dual-Fuel-Motoren, die sowohl mit Methanol als auch mit herkömmlichen Kraftstoffen betrieben werden können, sind verfügbar, was den Übergang für Schiffseigner erleichtert. Der flüssige Zustand von Methanol bei Umgebungstemperaturen und -druck bedeutet eine vereinfachte Lagerung und Handhabung im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff oder Ammoniak und erfordert weniger Änderungen an der bestehenden Infrastruktur.

Die Umrüstung bestehender Schiffe für die Verwendung von Methanol ist machbar, auch wenn dafür Änderungen an den Kraftstofftanktanks und anderen Systemen erforderlich wären. Das würde sich möglicherweise auf den Platz für Güter auswirken. Allerdings zeigen Beispiele wie die erfolgreiche Umrüstung von Schiffen wie der Stena Germanica, dass diese Änderungen effektiv durchgeführt werden können.

### 3.4.2 Ökonomische Analyse

Methanol bietet im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen einen kosteneffizienten Weg zur Dekarbonisierung. Der Investitionsaufwand (CAPEX) für mit Methanol betriebene Schiffe ist deutlich niedriger als bei anderen Alternativen wie Wasserstoff oder Ammoniak. Die für Methanol bestehende globale Infrastruktur reduziert die Kosten, die mit der Kraftstoffherstellung und -verteilung verbunden sind weiter, da Methanol bereits in über 100 Häfen weltweit verfügbar ist. Die Kosten für erneuerbares Methanol bleiben jedoch höher als jene für fossiles Methanol. Die Ausweitung der Produktion von erneuerbarem Methanol ist für die langfristige wirtschaftliche Lebensfähigkeit notwendig.

Öffentlich-private Partnerschaften, staatliche Anreize, und regulatorische Unterstützung sind für die Überbrückung der wirtschaftlichen Lücke und die Einführung von Methanol als nachhaltigen Kraftstoff entscheiden. Große Reedereien wie Maersk investieren in methanolbetriebene Schiffe, was Vertrauen in das wirtschaftliche Potenzial von Methanol als Schiffskraftstoff indiziert.

[23] https://publications.tno.nl/publication/34640817/zpBGh5/gerritse-2023-green.pdf

### 3.4.3 Ökologische Merkmale und Emissionen

Methanol gilt als emissionsarmer Schiffskraftstoff, insbesondere wenn er aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird. Grünes Methanol kann die Treibhausgasemissionen „well-to-wake“ um bis zu 99 % im Vergleich zu herkömmlichen Schiffskraftstoffen reduzieren. Darüber hinaus senkt Methanol auch andere schädliche Emissionen erheblich, wie z. B. Stickoxide (NOx), Schwefeloxide (SOx) und Feinstaub, was es zu einer umweltfreundlichen Alternative zu herkömmlichen Kraftstoffen macht.

Trotz seines Kohlenstoffgehalts trägt die Verbrennung von erneuerbarem Methanol nicht zum Nettoanstieg von Kohlendioxid in der Atmosphäre bei, da der bei der Verbrennung freigesetzte Kohlenstoff durch die Kohlenstoffbindung („carbon capture“) während der Produktion ausgeglichen wird. Dies macht Methanol zu einer attraktiven Option zur Verringerung des gesamten Kohlenstoff-Fußabdrucks der BS.

Unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit bietet Methanol mehrere Vorteile. Es kann aus einer Vielzahl von Rohstoffen hergestellt werden, einschließlich Biomasse und erneuerbarem Strom, was es widerstandsfähig gegen Versorgungsunterbrechungen und Preisschocks macht. Die Rolle von Methanol beim Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist ebenfalls von Bedeutung, da es aus Abfallstoffen und recyceltem Kohlenstoff hergestellt werden kann und so zur Ressourceneffizienz beiträgt.

Methanol wird als eine skalierbare Lösung angesehen, die mit minimalen Änderungen in die bestehende maritime Kraftstoffinfrastruktur integriert werden kann und zur Erreichung der umfassenderen Nachhaltigkeitsziele wie der Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und der Förderung erneuerbarer Energiequellen im Transportsektor, beiträgt.

### 3.4.4 Soziale Konsequenzen

Der Einsatz von Methanol in der BS hat mehrere soziale Auswirkungen. Einerseits können neue Arbeitsplätze im Bereich der Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe geschaffen werden und der Nachhaltigkeitsnachweis von Schifffahrtsunternehmen kann verbessert werden. Dies könnte ihren Ruf und Beziehungen zu den Interessengruppen verbessern. Die Umstellung auf Methanol könnte auch die Umweltverschmutzung in Hafenstädten und entlang der Wasserstraßen verringern, was zu einer besseren Gesundheit der Allgemeinheit führen könnte.

Allerdings gibt es Herausforderungen wie die Umschulung der Arbeitskräfte und Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit dem Umgang mit Methanol. Der chemische Stoff ist giftig, entflammbar und erfordert strenge Sicherheitsprotokolle, sowie eine spezielle Ausbildung für alle, die mit der Lagerung und Verwendung von Methanol zu tun haben. Außerdem kann sich der Übergang zu Methanol auf Arbeitsplätze in der traditionellen Industrie für fossile Brennstoffe auswirken, was Maßnahmen zur Unterstützung der betroffenen Arbeitnehmer während der Energiewende notwendig macht.

| ***Charakteristika*** | ***Methanol*** | ***Diesel*** |
|---|---|---|
| ***Treibhausgasemissionen*** | Niedriger als Diesel, kann nah an null sein, wenn aus erneuerbaren Quellen produziert | Hoch ($CO_2$, Methan, Stickstoffoxide, etc.) |
| ***Luftverschmutzung*** | Niedriger als Diesel, aber kann Formaldehyde und CO während Verbrennung produzieren | Hoch ($NO_x$, Feinstaub, Schwefeloxide) |
| ***Energiequelle*** | Kann aus erneuerbaren Quellen (z.B., Biomasse) oder fossil produziert werden | Fossil (nicht-erneuerbar) |
| ***Effizienz*** | Höher als bei Diesel in | Niedrigere Effizienz in |

| | | |
|---|---|---|
| | Brennstoffzellen, niedriger in Verbrennungsmotoren | internen Verbrennungsmotoren (25-30%) |
| ***Produktionsauswirkungen*** | Abhängig von der Produktionsmethode; erneuerbares Methanol hat niedrigere Auswirkungen als fossiles Methanol | Hohe Auswirkungen, umfasst Extraktion, Veredelung und Distribution |
| ***Wassernutzung*** | Moderat (abhängig vom Produktionsprozess) | Signifikant (In Extraktion, Veredelung, Kühlungsprozessen) |
| ***Lärmverschmutzung*** | Niedriger als bei Dieselmotoren | Hoch (Dieselmotoren sind laut) |
| ***Toxizität*** | Toxisch (Methanol ist hochgradig toxisch, wenn verzeht oder inhaliert) | Toxisch (Dieseldämpfe enthalten Karzinogene) |
| ***Lebenszyklus Emissionen*** | Kann nahe null sein, wenn aus erneuerbaren Quellen produziert, höher bei fossil-basierter Produktion | Hoch (Emissionen von Extraktion zu End-Anwendung) |
| ***Ressourcenverfügbarkeit*** | Potenziell erneuerbar (aus Biomasse oder Reststoffen), aber auch aus natürlichem Gas produziert | Endlich (Limitierte fossile Kraftstoffreserven) |

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Methanol eine praktikable und nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Schiffskraftstoffen darstellt, mit dem Potenzial zur Reduzierung der Emissionen in der BS. Allerdings wird seine breite Adoption die Überwindung wirtschaftlicher, technischer und sozialer Herausforderungen erfordern, unterstützt durch kontinuierliche Innovation und rechtliche Rahmenbedingungen.

## 3.4.5 Pilotprojekte

### Chemischer Tanker Stolt IJssel

**Jahr**: 2024

- Projektübersicht: Das Chemikalientankschiff Stolt IJssel wird im Rahmen eines Pilotprojekts für den Betrieb mit Methanol mit dem Ziel der Verringerung der Emissionen in der BS umgerüstet. Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Demonstration der Umsetzbarkeit und der Umweltvorteile von Methanol als Schiffskraftstoff.
- Schiff: Stolt IJssel
- Pilotstandort: Rhein
- Website: stolt-nielsen.de

### FASTWATER

**Jahr**: 2021

- Projektüberblick: Das FASTWATER-Projekt zielt darauf ab die Machbarkeit und die Vorteile von Methanol als nachhaltiger Kraftstoff in der Binnen- und Küstenschifffahrt zu demonstrieren. Es konzentriert sich auf die Umrüstung bestehender Schiffe auf Methanolantrieb, wodurch Emissionen wie Schwefel, Kohlenstoff und Feinstaub reduziert werden. Das Projekt hebt hervor, dass Methanol für kleine Boote und größere Schiffe in Häfen und Binnenwasserstraßen praktikabel ist.
- Schiff: Ein mit Methanol betriebenes Lotsenboot der schwedischen Schifffahrtsverwaltung (SMA).
- Pilotstandort: Hafen von Stockholm, Schweden

- Website: fastwater.eu

## 3.5 Ammoniak

Im Vergleich zu seiner Anwendung in der Seeschifffahrt steht Ammoniak in der BS vor deutlichen Herausforderungen und Chancen. Die Durchführbarkeit von Ammoniak als Treibstoff für die BS wird von mehreren Faktoren beeinflusst, darunter den Infrastrukturbedürfnissen, der Schiffskonstruktion und dem Betriebsprofil.

### 3.5.1 Technische Durchführbarkeit

Ammoniak ist ein weithin gehandelter chemischer Rohstoff. Dieser wird seit langem in Flüssiggastankern (LPG) transportiert, die ebenfalls in der Lage sind Ammoniak zu transportieren. Trotz seines Versprechens als grüner Treibstoff ist Ammoniak mit Herausforderungen verbunden, insbesondere aufgrund seiner Toxizität bei niedrigen Konzentrationen. Dies birgt Gesundheits- und Sicherheitsrisiken für die Besatzungsmitglieder, so dass es für die Schiffseigner unerlässlich ist, strenge Sicherheitsprotokolle einzuführen und die geltenden Vorschriften einzuhalten.

Die toxische und korrosive Natur von Ammoniak wirft ernste Sicherheitsbedenken für seine Verwendung in der BS auf. Der Umgang mit Ammoniak erfordert strenge Sicherheitsprotokolle, spezielle Schulungen und neue Vorschriften. In beengten Binnengewässern, in denen Schiffe in der Nähe von bewohnten Gebieten eingesetzt werden, birgt jede Leckage erhebliche Risiken. Im Vergleich zu Diesel, der vertrauter und weniger gefährlich ist, erfordert Ammoniak anspruchsvollere Systeme und Sicherheitsmaßnahmen. Dies erhöht die Komplexität und die Kosten für seine Einführung.

Ammoniak hat eine geringere Energiedichte als Diesel, was bedeutet, dass mehr Ammoniak benötigt wird, um die gleiche Energieleistung zu erzielen. Bei Binnenschiffen, die oft nur wenig Platz für die Lagerung von Kraftstoff haben, kann dies ein erheblicher Nachteil sein. Größere Kraftstofftanks verringern die Ladekapazität, was sich wiederum negativ auf die wirtschaftliche Durchführbarkeit des Betriebs auswirkt. Diesel, mit seiner höheren Energiedichte ermöglicht kompaktere Lagerungslösungen und eignet sich daher besser für den für die BS typischen Platzmangel.

Die Anpassung bestehender Schiffe auf die Verwendung von Ammoniak als Brennstoff würde umfangreiche Umrüstungen erfordern, insbesondere in Bezug auf Motoren und Speichersysteme. Neue Schiffskonstruktionen, die für Ammoniak optimiert sind, müssen einen größeren Speicherbedarf berücksichtigen und sicherstellen, dass die Sicherheitssysteme vollständig integriert sind. Dies erhöht die Anfangsinvestitionen für Betreiber, die eine Umstellung auf Ammoniak in Erwägung ziehen.

### 3.5.2 Ökonomische Analyse

Während Ammoniak von der bestehenden Lagerinfrastruktur und einem weltweiten Terminalnetz profitiert, trifft seine Einführung in der BS aufgrund des Fehlens einer Betankungsinfrastruktur auf erhebliche Hürden. Der Aufbau von Tankstellen in Binnenhäfen wird erhebliche Investitionen erfordern. Im Gegensatz zu Diesel, der von einer etablierten globalen Lieferkette profitiert, sind die Vertriebsnetze für Ammoniak noch unterentwickelt, insbesondere für Anwendungen im Binnenland. Seehäfen sind für den Umschlag von Ammoniak besser ausgestattet, aber die Nachbildung dieser Infrastruktur in der BS, insbesondere in kleineren und weniger kommerziell aktiven Häfen, stellt eine Herausforderung dar.

Binnenschiffe fahren im Allgemeinen über kürzere Entfernungen als ihre Pendants im Seeverkehr, haben aber einzigartige Beschränkungen in Bezug auf die Kraftstofflagerung und -dichte. Die geringere Energiedichte von Ammoniak im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen, wie Diesel, erfordert größere

Lagertanks, was für Schiffe, die in engen Räumen wie Flüssen und Kanälen verkehren, eine erhebliche Einschränkung darstellt.

Ammoniak ist derzeit teurer als Diesel pro Energieeinheit. Der Preis von Ammoniak, weitgehend von den Produktionskosten und der entstehenden Infrastruktur beeinflusst, liegt bei etwa 930 Euro pro Tonne, während Diesel rund 558 Euro pro Tonne kostet. Dieser Preisunterschied wird durch die zusätzlichen Kosten verschärft, die mit der Umrüstung von Schiffen und dem Aufbau der neuen Infrastruktur verbunden sind, wodurch Ammoniak kurzfristig eine weniger attraktive Option als Diesel ist. Da die Ammoniakproduktion jedoch zunimmt und grüner Ammoniak (welcher aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird) verfügbarer wird, könnten die Preise mit der Zeit sinken, wodurch sich der Abstand verringern würde.

### 3.5.3 Umweltmerkmale: Emissionen und Nachhaltigkeit

Ausgehend von den Emissionen bietet Ammoniak gegenüber Diesel erhebliche Vorteile in Bezug auf die Kohlenstoffdioxid (CO2)-Emissionen, hat aber Probleme mit Stickoxid-Emissionen (NOx).
Ammoniak stößt bei der Verbrennung kein CO2 aus, was es in dieser Hinsicht zu einem kohlenstofffreien Kraftstoff macht.
Allerdings stellt die Entstehung von NOx bei der Verbrennung von Ammoniak ein erhebliches Problem dar, da dieses zur Luftverschmutzung beitragen kann, wenn es nicht durch Nachbehandlungstechnologien wie der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) effektiv gemanaged wird. Diesel hingegen erzeugt sowohl CO2 als auch NOx in erheblichen Mengen, was ihn insgesamt zu einer weniger umweltfreundlichen Option macht.

### 3.5.4 Soziale Konsequenzen

Der Einsatz von Ammoniak als Kraftstoff in der BS hat mehrere soziale Auswirkungen. Der erhöhte Bedarf an spezialisierter Ausbildung und Sicherheitsprotokollen kann neue Beschäftigungsmöglichkeiten schaffen, bedeutet jedoch auch zusätzliche Verantwortung für die Besatzungsmitglieder. Außerdem könnte die Umstellung auf Ammoniak zu wirtschaftlichen Verschiebungen in Gemeinden führen, die auf traditionelle Brennstoffe angewiesen sind.

Dies würde dementsprechend Anpassungsmaßnahmen erfordern, um einen reibungslosen Übergang zu gewährleisten. Allerdings werden die langfristigen Vorteile der verringerten Emissionen und der verbesserten Umweltqualität aller Voraussicht nach positive Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit und das allgemeine Wohlbefinden von Gemeinden in der Nähe von Wasserstraßen haben.

| ***Charakteristika*** | ***Ammoniak*** | ***Diesel*** |
|---|---|---|
| ***Treibhausgasemissionen*** | Keine $CO_2$-Emissionen, wenn in Verbrennungs- oder Brennstoffzellen verwendet, aber $N_2O$ (ein potentes Treibhausgas) kann emittiert werden | Hoch ($CO_2$, Methan, Stickstoffoxide, etc.) |
| ***Luftverschmutzung*** | Niedriger als Diesel, aber Ammoniakverbrennung kann Stickstoffoxide ($NO_x$) freilassen | Hoch ($NO_x$, Feinstaub, Schwefeloxide) |
| ***Energiequelle*** | Kann aus erneuerbaren Energien produziert werden (Grüner Ammoniak) oder aus | Fossil (nicht erneuerbar) |

| | | |
|---|---|---|
| | fossilen Quellen (Grauer Ammoniak) | |
| ***Effizienz*** | Höher in Brennstoffzellen, niedriger in internen Verbrennungsmotoren | Niedrige Effizienz in internen Verbrennungsmotoren (25-30%) |
| ***Produktionsauswirkungen*** | Abhängig von der Produktionsmethode; Grüner Ammoniak hat niedrigere Auswirkungen im Vergleich zu einer fossil-basierten Produktion | Hohe Auswirkungen, umfasst Extraktion, Veredelung und Distribution |

## 3.5.5 Pilotprojekte und Blaupausen

**Pilotprojekt Ammoniak-Binnenschifffahrt (Hafen von Antwerpen)**

- Jahr: 2021 - Laufend
- Projekt-Übersicht: Der Hafen von Antwerpen hat ein Ammoniak-Pilotprojekt gestartet, um die Machbarkeit der Verwendung von Ammoniak als Schiffskraftstoff für Binnenschiffe zu ermitteln. Das Projekt umfasst die Umrüstung einer Barge für den Betrieb mit Ammoniak, sowie die gleichzeitige Entwicklung von Sicherheitsprotokollen und Bunkerinfrastruktur für den Kraftstoff. Dies ist Teil der umfassenderen Nachhaltigkeitsagenda des Hafens.
- Wichtigstes Schiff: Barge.
- Pilotstandort: Antwerpen, Belgien.
- Website: portofantwerpbruges.com

**Apollo Projekt**

- Jahr: 2024
- Überblick über das Projekt: Das Apollo-Projekt konzentriert sich auf die Umrüstung des Viking Energy Plattform Versorgungsschiffs auf die Verwendung von Ammoniak als Schiffskraftstoff. Das Projekt, das vom EU-Programm Horizon Europe finanziert wird, zielt darauf ab, die Treibhausgasemissionen um mehr als 70 % zu reduzieren und die Einsetzbarkeit von Ammoniak als sauberer Kraftstoff für die See- und BS zu demonstrieren.
- Wichtigstes Schiff: Plattformversorgungsschiff von Viking Energy.
- Pilotstandort: Europäische Gewässer, mit dem Potenzial zur Ausweitung auf Binnenwasserstraßen.
- Website: apollo-project.eu

## 3.5.6 Fazit

Während sich die Seeschifffahrt aufgrund der globalen Natur der Häfen und Schifffahrtsinfrastrukturen einfacher an die Lagerung und Betankung von Ammoniak in großem Maßstab anpassen kann, erfordert die BS eher lokalisierte Lösungen. Die Umrüstung bestehender Schiffe mit Ammoniak-kompatiblen Systemen oder die Konstruktion neuer Schiffe, die für Ammoniak optimiert sind, ist ein komplexer und schrittweise ablaufender Prozess in der BS.

Ammoniak könnte sich letztlich für Hochseegüterschiffe geeigneter erweisen, als für den Kurzstrecken-, Passagier- oder Binnenschifffahrtsbetrieb. Dennoch bleibt Ammoniak eine realisierbare Alternative, insbesondere für größere Binnenschiffe, die auf großen Wasserstraßen wie der Donau verkehren, wo längere Entfernungen und größere Ladungskapazitäten die Verwendung dieses alternativen Kraftstoffs rechtfertigen.

Die technische und wirtschaftliche Analyse zeigt, dass Ammoniak zwar vielversprechend als emissionsarmer Treibstoff für die BS ist, aber noch erhebliche Herausforderungen in Bezug auf die Entwicklung der Infrastruktur, Sicherheitsbedenken und Umrüstungskosten bestehen. Ammoniak ist derzeit

teurer als Diesel und seine Einführung würde umfangreiche Investitionen in neue Technologien und rechtliche Rahmenbedingungen erfordern. Aus der Sicht des Umweltschutzes bietet Ammoniak klare Vorteile in Bezug auf CO2-Emissionen, muss aber das Problem der NOx-Emissionen angehen, um langfristig eine brauchbare Alternative zu sein. Wenn die Ammoniakproduktion zunimmt und die Infrastruktur sich entwickelt könnte Ammoniak zu einer praktikableren Option für den Binnenschifffahrtssektor werden.

## 3.6 Hybride Systeme

Duale Kraftstoffsysteme in der BS beziehen sich auf Antriebssysteme, die mit zwei Arten von Kraftstoff betrieben werden können. In der Regel ist dies eine Kombination aus konventionellem fossilem Kraftstoff, wie Diesel, und einem saubereren alternativen Kraftstoff wie Flüssigerdgas (LNG), Wasserstoff oder Methanol. Diese Systeme bieten Betriebsflexibilität, indem sie den Schiffen ermöglichen abhängig von Faktoren wie Verfügbarkeit, Kosten oder Emissionsvorschriften zu wechseln. Duale Kraftstoffsysteme sind so konzipiert, dass sie die Kraftstoffeffizienz verbessern und die Emissionen durch den Einsatz sauberer Kraftstoffe verringern, wodurch die Schiffe die Einhaltung von Umweltvorschriften bei gleichbleibender Leistung ermöglichen.

Einer der Hauptvorteile von Dual-Fuel-Systemen ist ihre Flexibilität. Die Betreiber können zwischen den Kraftstoffarten umschalten und so die Kosten oder die gesetzlichen Auflagen optimieren. So kann ein Schiff zum Beispiel einen elektrischen Antrieb verwenden, wenn es in Zonen mit Emissionsbeschränkungen fährt und auf Diesel umsteigen, sobald dies möglich ist. Diese Anpassungsfähigkeit ist besonders vorteilhaft für Binnenschiffe, die in verschiedenen Regionen mit unterschiedlicher Kraftstoff-Infrastruktur betrieben werden. Neben der Flexibilität tragen Dual-Fuel Systeme einen wichtigen Beitrag zur Emissionsreduzierung bei. Sauberere Kraftstoffe wie Wasserstoff erzeugen weit weniger Kohlendioxid (CO2), Stickoxide (NOx) und Schwefelemissionen im Vergleich zu Diesel, was dabei hilft die immer strengeren Umweltnormen zu erfüllen.

In Europa werden bereits in mehreren Binnenschiffen duale Kraftstoffsysteme wie dieselelektrische Antriebe verwendet. In ähnlicher Weise werden Wasserstoff-Diesel-Dual-Systeme in Pilotprojekten wie dem Hydrotug in Belgien probiert, bei dem Wasserstoff als Hauptkraftstoff verwendet wird, während Diesel als Reserve dient. Methanol-Diesel-Dualkraftstoffsysteme sind ebenfalls eine praktikable Option, da Methanol einen niedrigeren Kohlenstoffgehalt und das Potenzial für die Herstellung aus erneuerbaren Quellen bietet.

Trotz dieser Vorteile stehen duale Kraftstoffsysteme vor Herausforderungen. Die für die Installation solcher Systeme erforderlichen Anfangsinvestitionen sind aufgrund der Komplexität und der Notwendigkeit eines zusätzlichen Kraftstofflagers höher. Außerdem ist die Verfügbarkeit von alternativen Kraftstoffen wie Methanol, Ammoniak oder Wasserstoff in vielen Regionen noch begrenzt, was die breite Nutzung dieser Systeme einschränkt. Da jedoch die Infrastruktur für sauberere Kraftstoffe ausgebaut wird, wird die praktische Anwendung von Dual-Fuel Systeme zunehmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass duale Kraftstoffsysteme eine praktische Lösung zur Reduzierung der Emissionen in der BS darstellen. Sie bieten ein Gleichgewicht zwischen Umweltverantwortung und betrieblicher Flexibilität. Sie sind zwar noch keine Universallösung, aber ein wichtiger Schritt in Richtung nachhaltiger Schifffahrtspraktiken, insbesondere da die Kraftstoffinfrastruktur weiterentwickelt wird.

## 3.7 Geschätzte Kosten

Die folgende Tabelle zeigt **die durchschnittlichen Kosten in EUR** für verschiedene alternative Antriebspilotprojekte, gemeinsam mit relevanten Websitequellen zur weiteren Information:

| Alternativer Antrieb | Pilotprojekttyp | Durchschnittl. Kosten pro Schiff (EUR) | Hauptkosten-faktoren | Websitequellen |
|---|---|---|---|---|
| **Biokraftstoffe (z.B. HVO, FAME)** | Schiffsumrüstung zur Verwendung von Biokraftstoffen | €500.000 – € 2 million | Kraftstoffinfrastruk-tur, Motoranpas-sungen, Betriebste-stungen | goodfuels.com, portofant-werpbruges.com |
| **Elektrischer Antrieb** | Batterieelektrische Schiffe (Neubau oder Umrüstung) | €900,000 – €4.5 million | Batteriesysteme. Elektrische Infra-struktur, hybride Systeme | zeroemissionser-vices.nl |
| **Wasserstoff-antrieb** | Wasserstoffbrenn-stoffzellen (Neubau oder Umrüstung) | €1,8 million – €6,3 million | Wasserstofflage-rung, Brennstoff-zellentechnologie, Sicherheitsmaß-nahmen, Infrastruk-tur | futureproofship-ping.com, www.elektra-boat.com |
| **Ammoniak-antrieb** | Ammoniakmotoren oder Brennstoffzel-len (Neubau oder Umrüstung) | €2,7 million – €7,2 million | Motoranpassun-gen, Ammoniakla-gerungsysteme, Si-cherheitsinfrastruk-tur | shipfc.eu, portofant-werpbruges.com |
| **Metanol** | Methanol-betriebene Schiffe (Konvertie-rung oder Neubau) | €1,5 million – € 5 million | Kraftstofflage-rungsanpassun-gen, Motoranpas-sungen, Emissi-onskontrollsysteme | sustainable-worldports.org, op.europa.eu |

Anmerkungen:

- Biokraftstoffe: Diese sind relativ erschwinglich, da sie oft mit vorhandenen Motoren verwendet werden können. Die Kosten entstehen durch die Infrastruktur und Modifikationen. Die Kosten für die Umrüstung von Schiffen auf Biokraftstoffe in der BS wie HVO (Hydriertes Pflanzenöl) und FAME (Fettsäuremethylester) liegen in der Regel zwischen 500.000€ und 2 Millionen € pro Schiff. Diese Kosten hängen von mehreren Faktoren ab, einschließlich notwendiger Motoränderungen und der Verfügbarkeit von nachhaltigen Biokraftstoff-Rohstoffen, die sich sowohl auf den Marktpreis als auch auf die Einhaltung der Vorschriften auswirken. Weitere Informationen bei GoodFuels und Port of Antwerp-Bruges.

- Elektrische Antriebe: Die Kosten werden durch Batteriegröße und Schiffskapazität bestimmt. Größere Schiffe benötigen Batterien mit höherer Kapazität. Details unter Port-Liner und ZES.

- Wasserstoffantrieb: Wasserstoffprojekte sind aufgrund der Lager- und Sicherheitsinfrastruktur kostspieliger. Mehr Info unter Future Proof Shipping und Elektra**.**

- Ammoniakantrieb: Ammoniakprojekte benötigen signifikante Investitionen in Sicherheit und Kraftstoffumgang. Mehr Details unter SHIPFC und Port of Antwerp-Bruges.

- Methanol: Diese Schätzungen für Methanol inkludieren Kosten welche mit notwendigen Sicherheitsmaßnahmen assoziiert werden, wie beispielsweise doppelwandige Kraftstoffleitungen, die Umwandlung existierender Motoren, und Emissionskontrollsysteme. Die Kosten reflektieren die

Ergebnisse von Pilotprojekten wie der Stena Germanica Konversion und Machbarkeitsstudien. Diese Schätzungen liefern einen Vergleich der Kosten für die Implementierung unterschiedlicher alternativer Antriebstechnologien im Binnenschifffahrtssektor, inklusive Um- und Neubauten von Schiffen.

# 4 Infrastruktur und Logistik: Vorbereitung der Grundlagen für Veränderung

Ein großes Hindernis für die Energiewende in der BS ist die derzeit fehlende Infrastruktur für alternative Kraftstoffe wie Wasserstoff, Strom oder Biodiesel. Traditionelle Kraftstoffe wie Diesel sind weiterhin die Norm, und das bestehende Netz von Bunker- und Ladestationen wird den Anforderungen der sauberen Energiequellen nicht gerecht. Die Umstellung auf saubere Energie und die zunehmende Digitalisierung in der BS bergen daher einige kritische infrastrukturelle Herausforderungen, die bewältigt werden müssen, um eine erfolgreiche Energiewende zu gewährleisten.

## 4.1 Der aktuelle Status der Kraftstoffinfrastruktur (Donau)

Da die Binnenschifffahrtsindustrie auf umweltfreundlichere, nachhaltigere Kraftstoffe setzt, gewinnt die Entwicklung der Bunkerinfrastruktur für alternative Antriebssysteme, einschließlich Biokraftstoffe, Wasserstoff und Methanol, immer mehr an Bedeutung. Dennoch bleibt Schiffsdiesel der vorherrschende Treibstoff für Schiffe, die auf der Donau navigieren. Die Infrastruktur für das Bunkern von Diesel ist gut etabliert, zahlreiche Häfen bieten Betankungsdienste für Binnenschiffe an. Wichtige Standorte für das Bunkern von Diesel entlang der Donau sind:

- Hafen Wien (Österreich): Einer der geschäftigsten Häfen entlang der Donau, der umfangreiche Bunkerservices für Marinediesel anbietet.
- Hafen Bratislava (Slowakei): Ein bedeutender Hafen mit Bunkerservices für Schiffe, die entlang der Donau betrieben werden.
- Hafen Budapest (Ungarn): Ein zentraler Hub für die BS, der Dieselbunkerfazilitäten für Güter- und Passagierschiffe anbietet.
- Hafen Novi Sad (Serbien): Bietet Marinedieselbunker für Schiffe an, die durch die untere Donauregion reisen.
- Hafen Ruse (Bulgarien): Ein Hafen in Bulgarien mit etablierten Dieselbunkerfazilitäten für Schiffe, die den unteren Donauabschnitt navigieren.
- Hafen Constanta (Rumänien): Rumäniens größter Hafen und Schlüsselstelle für Schiffe, die zwischen dem Schwarzen Meer und der Donau wechseln. Constanta ist ein strategischer Bunkerhub für Marinediesel.




*Bild 2: Standorte von Dieselbunkerstationen und Bunkerschiffen entlang der Donau*

## 4.2 Vorbereitungen für alternative Kraftstoffinfrastruktur entlang der Donau

Abbildung 2 präsentiert eine Karte der aktuellen Dieselinfrastruktur und zeigt sowohl Stationen als auch Schiffe. Verglichen mit der Oberen und Unteren Donau hat Ungarn weniger Stationen pro Kilometer. Während das kein größeres Problem für Diesel darstellt, da Schiffe große Distanzen mit einer Bunkerung zurücklegen können, könnte die Situation für alternative Treibstoffe mit niedrigerer Energiedichte, wie Wasserstoff oder elektrische Batterien, kritisch werden.

Weil diese sauberen Energielösungen frequenteres Tanken oder Beladen benötigen, wird ein dichteres Netzwerk and Tank- und Ladestationen notwendig sein. Ohne ausreichende Infrastruktur in Regionen wie Ungarn, wird der Übergang zu alternativen Treibstoffen signifikant erschwert.

Da jeder alternative Treibstoff – egal ob Biokraftstoffe, Wasserstoff oder Methanol – einzigartige Hindernisse und Anforderungen hat, die von Produktion und Lagermöglichkeiten hin zu spezifizierten Sicherheitssystem oder Lieferketten reichen, ist untenstehend ein Überblick über Gebiete darüber angeführt, wo Investitionen notwendig sind, um eine hochskalierte Bunkerinfrastruktur für alternative Treibstoffe zu etablieren.

### 4.2.1 Biokraftstoffe (HVO, FAME)

Biokraftstoffe bieten einen relativ einfachen Übergang von traditionellem Marinediesel, aufgrund ihrer Verfügbarkeit, als auch ihrer Möglichkeit existierende Motortechnologien mit geringen Anpassungen zu nutzen. Allerdings werden Investitionen dennoch benötigt, um eine Biokraftstoffinfrastruktur auf einer größeren Skala zu etablieren. Wichtige Investitionsbereiche inkludieren:

- Lagertanks und Rohrleitungen: Es müssen Anpassungen gemacht werden, um die Kompatibilität mit den chemischen Eigenschaften von Biokraftstoffen zu gewährleisten. Investitionen in korrosionsbeständige Materialien und spezielle Rohrleitungen sind erforderlich.
- Kraftstoffmischung und Vertriebszentren: Etablierung von Kraftstoffmischstationen und Transportlogistik, um Biokraftstoffe von den Produktionsanlagen zu den Bunkerstationen zu bewegen.
- Umrüstung bestehender Bunkeranlagen: Umrüstung von Bunkertankstellen für Schiffsdiesel für den Umgang mit Biokraftstoffen erfordert Investitionen in Sicherheitsprotokolle und Lagerkompatibilität.
- Kraftstoffproduktion und Lieferkette: Erhöhte Biokraftstoff-Produktionskapazitäten entlang der Donau erfordert Investitionen in lokale Produktionsanlagen.

Zwei Hauptakteure sind aktuell federführend was diesen Übergang entlang des Donaukorridors betrifft: Die OMV und die MOL-Gruppe.

- OMV, das österreichische integrierte Öl-, Gas- und Petrochemieunternehmen, hat eine starke Präsenz in der Donauregion. Das Unternehmen bietet HVO100-Kraftstoff an und ist in mehreren Ländern entlang des Flusses tätig. Einen wichtigen Schritt in Richtung Nachhaltigkeit macht die OMV Petrom, eine Tochtergesellschaft der OMV, mit einer angekündigten Investition in der Höhe von 750 Millionen Euro in ihrer Petrobrazi-Raffinerie in Rumänien[24]. Diese Investition wird die Raffinerie zum ersten großen Hersteller von nachhaltigen Kraftstoffen in Südosteuropa machen, mit Schwerpunkt auf der Produktion von nachhaltigem Flugkraftstoff (SAF) und erneuerbarem Diesel (HVO). Die neue Anlage wird über eine Produktionskapazität von 250 kt/ SAF und HVO, sowie Bio-Naphtha und Bio-LPG verfügen.

- Die MOL-Gruppe, ein ungarisches Öl- und Gasunternehmen, hat ebenfalls Fortschritte bei der Herstellung von Biokraftstoffen, einschließlich FAME, gemacht. Das Unternehmen ist in mehreren Ländern entlang der Donau tätig und positioniert sich als Lieferant von Biokraftstoffen für die BS. In jüngster Zeit hat die MOL-Gruppe[25] mit innovativer Biokraftstoffproduktion in ihrer Donau-Raffinerie begonnen. Diese Initiative umfasst die Mitverarbeitung von Bio-Rohstoffen wie Pflanzenölen, Altspeisefetten und tierischen Fetten mit fossilen Komponenten bei der Kraftstoffherstellung zu nachhaltigerem Diesel.

Beide Unternehmen fokussieren sich nicht nur auf die Produktion, sondern auch auf die gesamte Wertschöpfungskette von nachhaltigen Treibstoffen. Beispielsweise hat die OMV Petrom eine 50%ige Beteiligung an “Respiră Verde“ erworben, einem führenden Unternehmen in der Sammlung von Altspeiseölen in Rumänien, um eine verlässliche Quelle an Rohmaterialen für die Biokraftstoff-produktion sicherzustellen.

Diese Entwicklungen signalisieren eine erhebliche Verschiebung in der Energielandschaft der Donauregion, mit potenziellen Vorteilen für den Binnenschifffahrtssektor. Während diese Unternehmen weiterhin in nachhaltige Kraftstoffangebote investieren und diese expandieren, haben Binnenschifffahrtstreibende entlang der Donau steigenden Zugang zu sauberen Treibstoffoptionen. Dies trägt zu einer insgesamten Reduktion der Kohlenstoffdioxidemissionen im Transportsektor bei.

Während sowohl HVO (Hydriertes Pflanzenöl) als auch FAME (Fettsäuremethylester) vielversprechende sauberere Alternativen für Antriebe im Binnenschifffahrtstransport darstellen, gibt es wichtige Unterscheidungen, die zu beachten sind. Ein zentrales Bedenken im Zusammenhang mit HVO ist die Abhängigkeit der Europäischen Union von externen Quellen, welche die Region geopolitischen und geoökonomischen Risiken ohne Kontrolle aussetzen. Diese Abhängigkeit von Importen könnte zu einer Angebotsverknappung und unvorhersehbaren Kostensteigerungen führen. Hinzu kommt, dass dadurch, dass die Luftfahrt ihren HVO-Verbrauch steigern wird, um die Nachhaltigkeitsziele zu erfüllen, die BS gesteigertem Wettbewerb um den Kraftstoff ausgesetzt werden wird. Diese steigende Nachfrage könnte die Preise weiter erhöhen, was zusätzliche Herausforderungen für eine kosteneffektive Implementierung im Binnenschifffahrtstransport bedeutet.

### 4.2.2 Wasserstoff (H2)

Wasserstoff ist einer der vielversprechendsten emissionsarmen Kraftstoffe, aber die für das Bunkern

[24] https://www.romania-insider.com/omv-petrom-petrobrazi-producer-sustainable-fuels-2024
[25] https://molgroup.info/en/media-centre/press-releases/strategy-in-action-mol-group-starts-innovative-biofuel-production-at-danube-refinery

von Wasserstoff erforderliche Infrastruktur ist komplex und kostspielig. Wasserstoff kann durch Elektrolyse hergestellt und entweder als komprimiertes Gas oder als Flüssigkeit gespeichert werden.

Wasserstoff kann zwar aus der „tank-to-wake"-Perspektive als emissionsarm betrachtet werden, es hängt allerdings vom Ursprung der Produktion und den mit der Lieferkette verbundenen Umweltkosten ab, ob Wasserstoff als grau oder grün und damit als emissionsarm (oder nicht) betrachtet werden kann.

Zwei Studien können als Referenz dafür dienen, was die Folgen aus infrastruktureller Sicht sind: H2 meets H20 mit Fokus auf die Donau, und RH2INE mit Schwerpunkt auf dem Rhein.

**H2 meets H2O**

Die Ergebnisse des Projekts „H2 meets H2O", das von Pro Danube International[26] vorgestellt wurde, erforschen das Potenzial von Wasserstoff als nachhaltige Kraftstoffquelle für die BS auf der Donau. Ziel dieser Initiative ist die Entwicklung eines umfassenden Fahrplans für die Einführung der Wasserstofftechnologie in der Donauschifffahrt, der sowohl die Herausforderungen als auch die Chancen dieses innovativen Ansatzes berücksichtigt.

Eine der wichtigsten Innovationen, die das Projekt vorschlägt, ist die Verwendung von mit Wasserstoff gefüllten Druckbehältern als Speicherlösung. Dieser Ansatz bietet eine praktikable Methode für die Handhabung von Wasserstoff, ähnlich der Art, wie Schiffscontainer gehandhabt werden. Das System ermöglicht einen einfachen Austausch der Behälter, wodurch einige der größten Herausforderungen im Zusammenhang mit Wasserstoffspeicherung an Bord von Schiffen und der Notwendigkeit einer umfangreichen Betankungsinfrastruktur entlang der Donau adressiert werden.

Trotz ihres Potenzials wird die Einführung der Wasserstofftechnologie in der Donauschifffahrt mit mehreren Herausforderungen konfrontiert. Dazu gehören die begrenzte Infrastruktur für die Wasserstoffbetankung entlang des Flusses, die suboptimale Beschaffenheit der derzeitigen Wasserstoffspeichersysteme für Binnenschiffe, und die hohen Investitionskosten für sowohl die Schiffe als auch für die Entwicklung der Infrastruktur.

Die Möglichkeiten, die diese Technologie bietet werden jedoch als erheblich angesehen, darunter die signifikante Verringerung der Treibhausgasemissionen, die verbesserte Energieeffizienz durch die Brennstoffzellentechnologie, sowie potenzielle Synergieeffekte mit anderen Verkehrsträgern und Industrien. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen und um die gegebenen Möglichkeiten zu nutzen, skizziert das Projekt einen stufenweisen Fahrplan. Kurzfristig (bis 2025) wird der Schwerpunkt auf Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekten liegen. Die mittelfristige Phase (2025-2035) zielt auf den Ausbau der Infrastruktur für die Wasserstoffproduktion und -verteilung ab. Das langfristige Ziel (nach 2035) sieht eine breite Einführung der Wasserstofftechnologie in der BS vor.

Das Projekt „H2 meets H2O" unterstreicht das Potenzial von Wasserstoff als sauberer Treibstoff für die Donauschifffahrt und räumt gleichzeitig den zu überwindenden Hürden Platz ein. Der innovative Ansatz der Verwendung austauschbarer Druckwasserstoffbehälter bietet eine vielversprechende Lösung für einige der Infrastruktur- und Speicherprobleme. Letztendlich wird der Erfolg dieser Initiative von den koordinierten Bemühungen der verschiedenen Beteiligten abhängen, um den Weg für eine nachhaltige Zukunft in der BS zu ebnen.

**Erkenntnisse aus den „RH2INE kickstart studies"**

Die CEF-geförderten RH2INE Kickstart studies[27] stellen detaillierte Schätzungen über die Anzahl eines

[26] https://www.gsv.co.at/wp-content/uploads/2023%2005%2004%20Rafael%20Pro%20Danube%20International.pdf
[27] www.rh2ine.eu

ähnlichen Systems an Wasserstoffbehältern, Tankstellen und dem erwarteten Wasserstoffbedarf in verschiedenen Hafengebieten unter verschiedenen Szenarien auf dem Rhein bereit. Die Studie projiziert die Anzahl der benötigten gefüllten Wasserstoffbehälter pro Hafengebiet und pro Tag für die Jahre 2030 und 2040 unter den Szenarien einer niedrigen, mittleren und hohen Nachfrage. Diese Zahlen mögen zwar nicht repräsentativ für die Donauregion sein, geben allerdings eine Idee.

Für 2030
(Hohes Nachfrageszenario mit 300-bar Containern):

- Rotterdam Gebiet: Geschätzt 148 gefüllte Container pro Tag
- Duisburg Gebiet: Geschätzt 111 gefüllte Container pro Tag
- RheinCargo Gebiet (Neuss/Düsseldorf und Köln): Geschätzt 56 gefüllte Container pro Tag

Für 2030
(Niedriges Nachfrageszenario mit 300-bar Containern):

- Rotterdam Gebiet: Geschätzt 15 gefüllte Container pro Tag
- Duisburg Gebiet: Geschätzt 12 gefüllte Container pro Tag
- RheinCargo Gebiet: Geschätzt 6 gefüllte Container pro Tag

Diese Nummern basieren auf projizierter Wasserstoffnachfrage für Binnenschiffe, die entlang des Rheinkorridors betrieben werden und berücksichtigen Faktoren wie Schiffstypen, Betriebsprofile, und Energiekonsumption. Die Studie skizziert außerdem Wasserstoffkonsumprojektionen in drei Szenarien (Niedrig, Mittel, Hoch) für die Jahre 2030 und 2040:

Gesamte Wasserstoffnachfrage 2030:

- Niedriges Szenario: Geschätzt 5.000 Tonnen pro Jahr
- Hohes Szenario: Geschätzt 48.000 Tonnen pro Jahr

Gesamte Wasserstoffnachfrage 2040:

- Niedriges Szenario: Geschätzt 10.000 Tonnen pro Jahr
- Hohes Szenario: Geschätzt 104.000 Tonnen pro Jahr

Diese Bedarfsschätzungen sollen bei der Planung der erforderlichen Infrastruktur, wie Tankstellen und Speicheranlagen entlang des Rheins helfen. Die ermittelten Infrastrukturinvestitionen und -anforderungen sind wie folgt:

- Wasserstoff-Tankstellen: Die Studie unterstreicht den Bedarf an strategisch günstig gelegenen Wasserstofftankstellen in Hafennähe. Die Studie nennt zwar keine genaue Anzahl, schlägt allerdings vor, dass bestehende Containerterminals anfangs den Austausch von Wasserstoffbehältern übernehmen könnten, wodurch der Bedarf an neuer Infrastruktur kurzfristig minimiert wird.
- Aufstockung der Infrastruktur: Für die künftige Expansion empfiehlt die Studie, in zentralere Containerlösungen zu investieren und möglicherweise Standorte auf der grünen Wiese zu erschließen oder Massengut-Terminals zu nutzen, um eine erhöhte Nachfrage zu befriedigen.
- Standardisierungsbedarf: Die Studie unterstreicht die Bedeutung der Standardisierung von Containertypen, Druck (300 oder 500 bar) und Umschlaggeräten, um die Effizienz zu verbessern und Kosten zu senken, wenn die Anzahl wasserstoffbetriebener Schiffe steigt.

Die RH2INE-Kickstart-Studien lieferten quantitative Bewertungen des Infrastrukturbedarfs für die Einführung von Wasserstoff in der BS. Durch die Schätzung der Anzahl von Wasserstoffbehältern pro Tag und der Prognose des zukünftigen Wasserstoffbedarfs, bietet die Studie eine Grundlage für Planungs- und Investitionsentscheidungen, die zur Unterstützung des Übergangs zu Wasserstoff als Kraftstoff für Binnenschiffe unterstützt. Es ist zu beachten, dass die Studie vor einigen Jahren durchgeführt wurde, 2019-2020, und der Prozess der Erstellung eines Plans für den nächsten Schritt,

die sogenannte „supply facilitated by a entity“, die sich um den „Tanktainerpool“ kümmert, kurz vor dem Start im Jahr 2024 steht.

Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Prozess der Schaffung der infrastrukturellen Rahmenbedingungen zeitaufwendig ist, was teilweise auf das Henne-Ei-Problem schließen lässt: Ohne Nachfrage gibt es keine Grundlage für das Angebot, aber ohne ein ausreichendes Angebot wird die Nachfrage nicht steigen. Hervorragendes Stakeholder-Management, öffentliche Unterstützung und unternehmerisches Denken scheinen in diesem Fall die entscheidenden Bestandteile zu sein. Während neues Momentum im Rheingebiet entsteht, ist es ratsam, die Entwicklungen genau zu beobachten, insbesondere, da die Standardisierung als eine Notwendigkeit angesehen wird, um die Dynamik aufrechtzuerhalten und den Prozess der Markterschließung zu beschleunigen.

### Landseitig zu beachten

Investitionen[28] in Elektrolyseanlagen sind entscheidend für die Produktion von grünem Wasserstoff in großem Maßstab. Diese Anlagen werden sich auf erneuerbare Energiequellen stützen, wie Sonnen- oder Windenergie, um Wasserstoff durch Wasserelektrolyse zu erzeugen und so eine nachhaltige Versorgung der Binnenschiffe zu gewährleisten. Spezialisierte Speicher Tanks, die für die Handhabung von Wasserstoff unter hohem Druck oder unter kryogenen Bedingungen ausgelegt sind, sind für eine sichere und effiziente Speicherung ebenfalls unerlässlich.

Diese Tanks müssen den einzigartigen Eigenschaften von Wasserstoff gerecht werden, die fortschrittliche Materialien und Technologien erfordern, um seine Stabilität zu erhalten. Investitionen sind auch erforderlich in Verteilersysteme, wie Pipelines oder Lastwagen, um Wasserstoff von den Produktionsstätten zu den Bunkeranlagen zu transportieren. Diese Systeme spielen eine zentrale Rolle in einer zuverlässigen Wasserstoffversorgungskette für die BS. Schließlich müssen die Wasserstofftankstellen mit den notwendigen Sicherheitsprotokollen ausgestattet sein, um sicher mit dem Gas umzugehen. Bunkerstationen benötigen robuste Betankungssysteme, die in der Lage sind mit den Eigenschaften von Wasserstoff umzugehen und gleichzeitig die Sicherheit von Personal und Infrastruktur zu gewährleisten.

### Zu beachten für Schiffe

Für kleinere Schiffe wie Motorgüterschiffe (MCVs) ist der Betrieb mit Wasserstoff mit einem Bunkerstopps auf einer typischen Route machbar. Beispielsweise müsste ein Motorgüterschiff zwischen Budapest und Regensburg nur einen Bunkerstopp in Wien oder Linz einlegen und somit drei 20-Fuß Wasserstoffcontainer für die Reise verwenden.[29] Bei größeren Schubverbänden wäre jedoch eine häufigere Betankung erforderlich - möglicherweise zwei Zwischenstopps auf der gleichen Strecke - aufgrund des höheren Energieverbrauchs.

Die gleiche Evaluierung zeigt auch, dass kleinere Schiffe mit geringerem Energiebedarf im derzeitigen Stadium besser mit der Wasserstoff-Technologie kompatibel sind. So sind beispielsweise Motorgüterschiffe, die in der Betriebsart A1 (bis zu 14 Stunden ununterbrochene Fahrt) auf der oberen Donau eingesetzt werden, ideale Kandidaten für Wasserstoff als Kraftstoff. Größere Schubverbände, die mehr Energie benötigen, stehen jedoch aufgrund des Volumens und der Masse der Wasserstofftanks vor Herausforderungen. Dies macht ihren Betrieb ohne technische Fortschritte weniger effizient mit Wasserstoff.

---

[28] Geschätzte Investitionsspanne: 10 bis 50 Mio. € pro Standort (je nachdem, ob komprimierter oder flüssiger Wasserstoff verwendet wird und wie groß die Elektrolyse und die Speicheranlagen sind). Quellen: Hydrogen Council report on hydrogen infrastructure investment (2021), Fuel Cells
and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) cost analysis for hydrogen refueling infrastructure (2020).

[29] Evaluation of the applicability of hydrogen as fuel in Danube navigation, J. Schweighofer 2023, Institute of Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems, Graz University of Technology

Was die Regionen betrifft, so ist die Hafendichte entlang der oberen Donau für den Einsatz von Wasserstoff mit Entfernungen zwischen den Häfen von etwa 100 bis 150 Kilometern ausreichend, so dass die Betankung von wasserstoffbetriebenen Schiffen ohne größere Unterbrechungen möglich ist. Wasserstoff stellt somit eine vielversprechende Zukunft für die Dekarbonisierung der BS auf der Donau dar, insbesondere für kleinere Schiffe, die auf kürzeren Strecken verkehren. Für eine allgemeinere Anwendung sind der Ausbau der Hafeninfrastruktur und die Bewältigung der logistischen Anforderungen der Wasserstoffbunkerung der Schlüssel für eine breite Anwendung von Wasserstoff als Kraftstoff für die Donauschifffahrt.

### Infrastruktur: Lücken identifizieren

Da aktuelle Containerumschlagsanlagen in der Implementierung des austauschbaren Tanktainer Konzepts eine kritische Rolle spielen, ist es sinnvoll einen Blick auf den aktuellen Status dieser Anlagen entlang der Donau zu werfen. Hier ist ein Überblick über die wichtigsten Häfen entlang der Donau die Containerumschlagsanlagen besitzen, gelistet nach Land:

1. Deutschland
    - Hafen Deggendorf: Ein wichtiger Containerterminal für die Bayernregion, der sich auf der oberen Donau befindet.
2. Österreich
    - Hafen Wien: Das größte Containerumschlagsterminal in Österreich, spielt eine Schlüsselrolle im internationalen Containertransport.
    - Hafen Linz: Ein industrieller Hafen mit extensiven Containerumschlagskapazitäten.
    - Hafen Enns: Österreich größtes Inlandterminal, das sich bei der Einmündung der Enns und der Donau befindet.
3. Slowakei
    - Hafen Bratislava: Wichtig für Containerumschlag in den Regionen und verbindet internationale Märkte.
4. Ungarn
    - Hafen Budapest (Csepel): Das größte und entwickeltste Containerumschlagsterminal in Ungarn, verbunden mit Schiene und Straße.
    - Hafen Baja: Ein kleinerer, aber strategisch signifikanter Containerhafen in Südungarn.
5. Kroatien
    - Hafen Vukovar: Der einzige Hauptcontainerumschlagsort in Kroatien an der Donau.
6. Serbien
    - Hafen Belgrad: Ein wichtiger Containerumschlagsstandort und Logistikhub für die Region.
    - Hafen Novi Sad: Ein industrieller Hafen mit Containerumschlagsanlagen.
7. Bulgarien
    - Hafen Ruse: Einer von Bulgariens größten Häfen entlang der Donau, mit Containerumschlagsmöglichkeiten.
8. Rumänien
    - Hafen Constanta: Verbunden mit der Donau via dem Donau-Schwarzmeerkanal. Rumäniens größter Seehafen und ein wichtiger Hub für Containertransporte ins Hinterland.
    - Hafen Giurgui: Ein zentraler rumänischer Hafen mit Containerumschlagsanlagen.
    - Hafen Galati: Der größte Donauhafen Rumäniens mit einem signifikanten Containerterminal.
9. Ukraine
    - Hafen Reni: Strategisch platziert nahe der Donaumündung, mit Containerumschlagsanlagen.

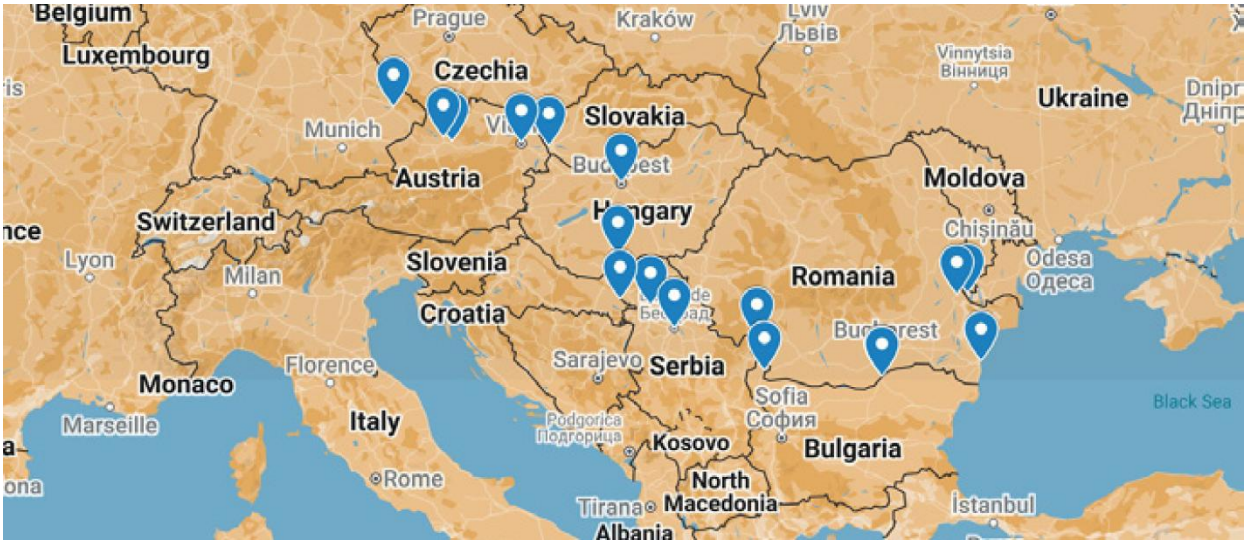



*Bild 3: Containerumschlagsanlagen entlang der Donau*

Dieser Überblick hebt die wichtigsten Containerumschlagsstandorte entlang der Donau hervor. Einige Häfen haben große Anlagen mit extensiven Einrichtungen, andere bieten kleiner-skalierte Containerumschläge für den lokalen oder regionalen Transport an.

Um eine adäquate Infrastruktur für Wasserstofftanktainer zu haben, wäre eine Containerumschlagsanlage alle 200km entlang der Donau ideal. Aktuell ist der Punkt-zu-Punkt Abstand zwischen den Anlagen entlang der Donau wie folgt:

| Von | Bis | Distanz (km) |
|---|---|---|
| Deggendorf | Linz | 150 |
| Linz | Krems | 112 |
| Krems | Wien | 83 |
| Wien | Bratislava | 51 |
| Bratislava | Budapest | 221 |
| Budapest | Baja | 169 |
| Baja | Vukovar | 146 |
| Vukovar | Novi Sad | 79 |
| Novi Sad | Belgrad | 84 |
| Belgrad | Drobeta-Turnu Severin | 239 |
| Drobeta-Turnu Severin | Vidin | 140 |
| Vidin | Ruse | 296 |
| Ruse | Giurgiu | 6 |
| Giurgiu | Galati | 334 |
| Galati | Reni | 23 |
| Reni | Constanța | 132 |

Identifizierte Häfen, die helfen könnten die Lücken zu schließen, dort wo die Distanz existierender Containerumschlagsanlagen 200km übersteigt:

1. Bratislava bis Budapest (221km)
    - Dieser Abschnitt ist über 200km, ein Zwischenhafen wäre notwendig um das Infrastrukturziel zu erreichen. Potenzielle Häfen:
    - Komárom (Ungarn): Befindet sich circa auf dem halben Weg zwischen Bratislava und Budapest und ist ein Spitzenkandidat für die Containerumschlagsentwicklung. Komárom hat einen industriellen Hafen, der expandiert werden könnte.

- Esztergom (Ungarn): Situiert nördlich von Budapest könnte Esztergom ein zweiter Kandidat für die Hafenentwicklung sein.

2. Belgrad bis Drobeta-Turnu Severin (239km):
    - Diese Lücke übersteigt 200km, eine Zwischenanlage würde die Abdeckung verbessern. Potenzielle Häfen:
    - Smederevo (Serbien): Befindet sich östlich von Belgrad entlang der Donau, Smederevo hat einen Hafen und könnte als Containerumschlagsanlage eingestuft werden.
    - Veliko Gradište (Serbien): Eine weitere potenzielle Option, wenngleich kleiner als Smederevo.
    - Kladovo (Serbien): Näher an Drobeta-Turnu Severin positioniert könnte auch Kladovo die Lücke überbrücken.

3. Vidin bis Ruse (296km)
    - Dies ist eine signifikante Lücke, die Entwicklung eines Hafens zwischen diesen zweien wäre notwendig. Potenzielle Häfen:
    - Lom (Bulgarien): Befindlich auf halbem Weg zwischen Vidin und Ruse, verfügt Lom bereits über einen Hafen und könnte mit Containerumschlagsanlagen aufgewertet werden.
    - Svishtov (Bulgarien): Eine weitere mögliche Option, die sich weiter flussaufwärts befindet, Svishtov hat Hafenanlagen, die weiter ausgebaut werden könnten.

4. Giurgiu bis Galati (334km)
    - Das ist die größte Lücke und es ist wichtig eine zwischengelegene Containeranlage zu haben. Potenzieller Hafen:
    - Călărași (Rumänien): Circa auf der Hälfte zwischen Giurgiu und Galati positioniert könnte Călărași ein strategischer Hafen für Entwicklung sein.
    - Brăila (Rumänien): Eine weitere Option nahe Galati, Brăila hat bereits eine Hafeninfrastruktur und könnte für den Containerumschlag adaptiert werden.

Zusammenfassung der potenziellen Häfen für eine Aufwertung durch Anlagen, um eine Wasserstoff Taintainerpool Infrastruktur zu unterstützen:

- Bratislava bis Budapest: Komárom, Esztergom
- Belgrade bis Drobeta-Turnu Severin: Smederevo, Veliko Gradište, Kladovo
- Vidin bis Ruse: Lom, Svishtov
- Giurgiu bis Galati: Călărași, Brăila

Diese Häfen befinden sich innerhalb der großen Abstände und haben Entwicklungspotenzial, um eine konsistentere Containerumschlagsinfrastruktur alle 200km sicherzustellen.

### 4.2.3 Methanol

Um Methanol zu einem rentablen alternativen Kraftstoff für die BS auf der Donau zu machen, sind erhebliche infrastrukturelle Entwicklungen erforderlich. Zunächst müssen vor allem Tankstellen entlang des Flusses eingerichtet werden - strategisch dort platziert wo der Schiffsverkehr am stärksten ist. Diese Tankstellen müssten Methanol sicher lagern und müssten ausgestattet sein, um häufige Betankungen bewältigen zu können, denn Methanol hat eine geringere Energiedichte als Diesel, was häufigere Tankstopps erfordert.

Die Entwicklung der Infrastruktur sollte nicht nur die Häfen, sondern auch Methanol-Produktions- und Versorgungsketten einbeziehen, um eine ununterbrochene Kraftstoffversorgung für Schiffe auf der Donau

zu ermöglichen.

Außerdem muss die Lager- und Sicherheitsinfrastruktur auf den Schiffen selbst aufgerüstet werden, um Methanol aufnehmen zu können. Methanol ist ein flüssiger Brennstoff, der leichter gelagert werden kann als Wasserstoff, aber giftig ist und spezielle Tank- und Handhabungsverfahren erfordert, um einen sicheren Transport und Gebrauch zu gewährleisten. Die Schiffe müssen erheblich nachgerüstet werden, um methanoltaugliche Motoren und Speichersysteme zu integrieren. Sicherheitsprotokolle für den Umgang mit Methanol, Reaktionen auf Leckagen, und eine Emissionskontrolle müssen eingeführt werden, um mit den Umwelt- und Sicherheitsstandards konform zu gehen. Dies treibt die Notwendigkeit von ausgedehntem Training und Investitionen in Systeme an Bord und in Hafenanlagen weiter voran.

Abschließend lässt sich sagen, dass die  erfolgreiche Einführung von Methanol als alternativer Kraftstoff in hohem Maße von der Entwicklung der unterstützenden Infrastruktur abhängt, wie beispielsweise die Entwicklung von Methanol-Produktionsanlagen und der Transportlogistik für die Lieferung des Kraftstoffs zu Tankstationen. Zusammenarbeit zwischen Regierungen, Kraftstoffproduzenten und Logistikanbietern ist notwendig, um eine verlässliche Lieferkette aufzubauen. Zusätzlich werden regulatorische Rahmenbedingungen, die Anreize für die Verwendung von Methanol schaffen und Subventionen für Infrastrukturaufwertungen bereitstellen, notwendig sein, um Methanol als grünen Treibstoff für die BS auf der Donau durchzusetzen.

Zentrale Investitionsbereiche[30]:

- Lagertanks: Methanol erfordert Tanks aus kompatiblen Materialien wie rostfreiem Stahl.
- Bunkerstationen: Betankungssysteme benötigen Leckageerkennung und Dampfrückgewinnungssysteme für die Handhabung von Methanol.
- Infrastruktur für die Kraftstoffverteilung: Investitionen in eine zuverlässige Lieferkette für Methanol, einschließlich möglicher Partnerschaften mit Chemieproduzenten.
- Umrüstung bestehender Bunkerstationen: Änderungen an der bestehenden Betankungsinfrastruktur für den Umgang mit Methanol.

Die Methanolproduktion entlang der Donau ist, aufgrund des Fehlens großer chemischer Industrien die für den Rhein typisch sind, gering. Die Methanolproduktion stützt sich traditionell auf Erdgas oder Kohle als Ausgangsstoffe, die entlang des Donaukorridors nicht in großem Umfang verfügbar sind. Es gibt jedoch Projekte zur Erforschung der umweltfreundlichen Methanolproduktion mit erneuerbaren Rohstoffen in Europa, die sich allerdings noch in einem frühen Stadium befinden und außerhalb des Donauraums konzentriert sind.

Die Häfen entlang der Donau verfügen nur über begrenzte Methanol-Lagereinrichtungen, da die meisten noch nicht für alternative Kraftstoffe jenseits von herkömmlichem Diesel und Biokraftstoffen ausgerüstet sind. Einige österreichische Häfen erwägen Methanollagerlösungen, da Methanol im Vergleich zu LNG relativ einfach zu lagern ist (nicht kryogen, flüssig bei Umgebungstemperatur), was es zu einer praktikableren Alternative für zukünftiges Bunkern macht. So prüft beispielsweise Wien die Machbarkeit von Methanol im Rahmen seiner Initiative für alternative Kraftstoffe, wobei die Errichtung von Bunkeranlagen in großem Maßstab allerdings noch aussteht.

Investitionen in Methanol-Bunkeranlagen in Häfen wie Wien, Budapest, Novi Sad, Ruse, Galati und Agiega/Constanța sichern die Abdeckung der gesamten Donau, vom oberen bis zum unteren Abschnitt. Diese Standorte sind entscheidend für die Ermöglichung des Langstreckenverkehrs und für die Sicherstellung, dass die Schiffe Zugang zu alternativen Kraftstoffen haben, was für die Dekarbonisierung

[30] Geschätzter Investitionsbereich: €1 Million bis €10 Millionen pro Standort (je nach Größe der Lager- und Bunkeranlagen). Quellen: Methanol Institute report on methanol bunkering (2021), FASTWATER Project reports on methanol infrastructure and retrofit costs (2022).

des Schifffahrtssektors unerlässlich ist. Jeder Hafen bietet einzigartige Vorteile in Bezug auf Verkehrsaufkommen, industrielle Präsenz und logistische Anbindung, die sie für derartige Investitionen ideal machen.

### 4.2.4 Ammoniak

Durch die Umwandlung von Wasserstoff in Ammoniak kann dieser leicht über weite Strecken transportiert werden. Damit Ammoniak zu einem brauchbaren Treibstoff für die BS auf der Donau wird, sind wichtige Infrastrukturinvestitionen erforderlich. Zunächst müssen in strategisch wichtigen Häfen wie Wien, Budapest, Novi Sad, Ruse, Galati und Agiega/Constanța spezielle Bunkerstationen errichtet werden. Diese Häfen sind aufgrund ihres starken Verkehrsaufkommens ideale Standorte für die Einrichtung von Betankungsstellen für Schiffe. Der Bau von sicheren Lagereinrichtungen für Ammoniak, ausgestattet mit fortschrittlichen Sicherheitssystemen wie Leckerkennung und Notfallprotokollen, ist unerlässlich.

Darüber hinaus muss die Infrastruktur auch Umrüstungen für bestehende Schiffe oder Investitionen in neue mit Ammoniak betriebene Schiffe umfassen. Diese Schiffe benötigen sichere und effiziente Lager- und Umschlagsysteme, aufgrund der Toxizität des Kraftstoffes. Hafenpersonal und Besatzungen müssen in speziellen Umschlagstechniken geschult werden, was eine weitere Ebene der infrastrukturellen Vorbereitung darstellt.

Abschließend ist eine zuverlässige Versorgungskette für Ammoniak von entscheidender Bedeutung. Dies könnte den Bau von Produktionsanlagen in der Nähe der industriellen Knotenpunkte entlang der Donau umfassen. Investitionen in Pipelines oder spezielle Transportlösungen werden auch erforderlich sein, um eine ununterbrochene Versorgung der Bunkerstationen zu gewährleisten. Ohne diese Infrastrukturentwicklungen wird das Potenzial von Ammoniak als nachhaltige Alternative für die BS begrenzt sein. HGK Shipping leistet dabei Pionierarbeit in der BS mit der Entwicklung des neuen Schiffes „Pioneer“. Dieses innovative Schiff soll den Transport von Flüssiggasen revolutionieren, insbesondere von kalt verflüssigtem Ammoniak (NH3) und verflüssigtem Kohlendioxid ($LCO_2$), auf den europäischen Binnenwasserstraßen. Pioneer, mit einer Länge von 135 Metern und 17,5 Metern Breite stellt im Vergleich zu den derzeitigen Gastankschiffen einen bedeutenden Kapazitätssprung im Vergleich zu aktuellen Gastankern dar. Seine innovativen Tank- und Ladesysteme sind auf die effiziente Handhabung von Gasen in verflüssigter Form zugeschnitten. Eine der bemerkenswertesten Merkmale des Schiffes ist die Fähigkeit, kaltes verflüssigtes Ammoniak bei Temperaturen von bis zu -33 Grad Celsius zu transportieren, wodurch energieintensive Wärmebehandlungsprozesse in den Häfen wegfallen.[31]

Dieses Projekt zielt einerseits darauf ab, neue Standards für den sicheren und effizienten Transport von Ammoniak, das aus „grünem“ Wasserstoff gewonnenen wird, zu setzen, andererseits auf die Beseitigung von unvermeidbarem Kohlendioxid aus industriellen Produktionsstätten. Das dieselelektrische Antriebskonzept und das Flachwasserdesign des Schiffes, machen es ideal für den Verkehr zwischen den Häfen Amsterdam-Rotterdam-Antwerpen (ARA) und weiter rheinaufwärts gelegenen Häfen. Es bietet effiziente Alternativen zum Pipelinetransport von Wasserstoffderivaten und Kohlendioxid und gleicht sich damit an „Carbon capture and storage“ (CCS) Methoden an.

## 4.3 Einheitliche Infrastrukturinvestitionen für alle Kraftstoffe

Um die Einführung alternativer Kraftstoffe in der BS zu unterstützen, sind unabhängig von der Wahl des Kraftstoffs mehrere gemeinsame Infrastrukturelemente erforderlich. Erstens ist der Ausbau der Hafeninfrastruktur unerlässlich. Die Häfen müssen ihre Anlagen erweitern und anpassen, um alternative Kraftstoffe sicher handzuhaben. Dazu gehören die Einrichtung ausgewiesener Sicherheitszonen, die Modernisierung der Kraftstofflager und die Allokation von mehr Platz für Betankungsvorgänge.

[31] https://swzmaritime.nl/news/2024/04/18/hgk-develops-inland-tanker-for-shipping-ammonia-and-lco2/

Außerdem spielt die intermodale Logistik eine entscheidende Rolle bei der Versorgung der Binnenschiffe mit alternativen Kraftstoffen. Investitionen in Logistikknotenpunkte, die Straße, Schiene und Wasserstraßen miteinander verbinden, sind der Schlüssel für effizienten Kraftstofftransport und -verteilung. Diese Drehkreuze werden die nahtlose Integration verschiedener Verkehrsträger ermöglichen, welche die Kraftstoffversorgungsketten von den Produktionsstätten zu den Tankstellen unterstützen.

Darüber hinaus ist die Einführung fortschrittlicher Digitalisierungs- und Überwachungssysteme erforderlich. Diese Systeme überwachen Kraftstoffstände, erkennen Lecks, optimieren die Kraftstoffverteilung und sorgen für Sicherheit und Effizienz bei dem Umgang mit alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff, Ammoniak oder Methanol. Die Digitalisierung der Kraftstoffversorgungskette wird auch die Echtzeitverfolgung der Kraftstoffverfügbarkeit und die Verteilung in den Häfen verbessern.

Schließlich ist die grenzüberschreitende Zusammenarbeit entscheidend für den Erfolg der Einführung alternativer Kraftstoffe. Die Länder entlang der Donau müssen Vorschriften, Sicherheitsstandards und rechtliche Rahmenbedingungen harmonisieren, um den nahtlosen Verkehr von Schiffen mit alternativen Kraftstoffen zu gewährleisten. Investitionen in die Einführung dieser internationalen Abkommen und Sicherheitsprotokolle werden einen reibungsloseren grenzüberschreitenden Betrieb fördern, wodurch bürokratische Hindernisse abgebaut und einheitliche Sicherheitspraktiken sichergestellt werden. Gemeinsam werden diese Infrastrukturinvestitionen den Weg für eine sauberere und effizientere BS ebnen.

## 4.4 Weitere relevante Infrastruktur für Alternative Antriebe auf der Donau: Landstrom und Erkenntnisse von LNG

Bei der Förderung nachhaltiger Antriebe auf der Donau hebt ein realistischer Ansatz konkrete Pilotprojekte und die Lehren aus früheren Initiativen hervor. Hier ist ein genauerer Blick auf die laufenden Bemühungen zur landseitigen Elektrifizierung der Schifffahrt und die Herausforderungen, vor welchen die LNG-Infrastruktur in der Region steht.

### Landstromprojekte

Die landseitige Elektrifizierung sorgt für unmittelbare Emissionsreduzierung, da sich dadurch, dass sich die Schiffe an das Stromnetz anschließen, der Bedarf an Dieselmotoren an Bord reduziert. Dank zwei Landstromaggregaten ist seit dem 19. Juni 2023 ein saubereres, nachhaltigeres Anlegeerlebnis für Güterschiffe auf der österreichischen Donau möglich.

An den Ufern der österreichischen Donau, an zwei öffentlichen Anlegestellen, Linz (Fluss-km 2.129,2 - 2.129,0; rechtes Ufer) und Wildungsmauer (Strom-km 1.895,1 - 1.894,8; rechtes Ufer), stehen nun zwei Landstromanlagen mit je 400 V zur Verfügung. Diese, dem Stand der Technik entsprechenden Anlagen verfügen an deren Unterseite über drei 16 A, 32 A und 63 A-Anschlüsse (CEE) und bieten somit Anschlussmöglichkeiten für Anleger in mehreren Reihen.[32]

### LNG in der Donauregion

LNG wurde bisher als „Brückenkraftstoff“ für einen saubereren Antrieb auf der Donau betrachtet. Allerdings haben mehrere Projekte Rückschläge erlitten, was die Stakeholder dazu veranlasste, die Machbarkeit von LNG in dieser Region zu überdenken. Der LNG-Masterplan für Rhein-Main-Donau (2013 - 2018) zum Beispiel: Dieser umfassende Plan sah ein transeuropäisches LNG-Netz vor, das auch die Donau einschließt. Er stieß jedoch auf erhebliche wirtschaftliche Hindernisse - schwankende LNG-Preise und eine unzureichende Nachfrage hatten eine abschreckende Wirkung. Die Betreiber empfanden die

[32] https://www.inlandwaterwaytransport.eu/shore-power-danube/

Kosteneinsparungen schlussendlich als minimal, was die Wirkung des Plans einschränkte.[33]

# 5 Vergleich alternativer Antriebssysteme & Regulierung

Durch die Bewertung der Umweltauswirkungen und der sozialen Folgen der einzelnen Alternativen werden wir einen umfassenden Überblick darüber geben, wie diese Technologien zu einer umweltfreundlicheren und sozialverträglicheren Zukunft der Güterschifffahrt auf der Donau beitragen können. Wir werden uns ebenfalls mit der praktischen Seite beschäftigen: Was ist aus rechtlicher Sicht erlaubt und was (noch) nicht?

## 5.1 Ammoniak, Wasserstoff und Methanol

Bei der Analyse des Potenzials alternativer Kraftstoffe für die BS stechen Ammoniak und Wasserstoff als bedeutende Anwärter für die Verringerung der Kohlenstoffemissionen heraus, obwohl jeder dieser Kraftstoffe spezifische Herausforderungen mit sich bringt. Bei der Verbrennung von Ammoniak beispielsweise entsteht kein CO2, was es zu einer attraktiven Option für die Dekarbonisierung der BS macht. Bei der Herstellung aus erneuerbaren Energien wird Ammoniak zu „grünem Ammoniak“, einem kohlenstofffreien Kraftstoff, der von der Herstellung bis zur Verwendung umweltfreundlich ist, d. h. auch aus der Perspektive „well-to-wake“ keine Emissionen verursacht.

Dies bietet Schiffsbetreibern eine Kraftstoffoption mit dem Potenzial keiner CO2-Emissionen in der „well-to-wake“-Perspektive, was dazu beiträgt, selbst die strengsten langfristigen Emissionsreduktionsziele zu erreichen. Die Einführung dieses Kraftstoffs steht jedoch vor Hindernissen wie Infrastrukturanforderungen und Sicherheitsbedenken aufgrund seiner Toxizität und Korrosivität. Ammoniak erzeugt außerdem bei der Verbrennung Stickoxide (NOx), was fortschrittliche Nachbehandlungssysteme zur Emissionsminderung erfordert.

Wasserstoff bietet ebenfalls das Versprechen von null CO2-Emissionen, insbesondere wenn er aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird. Wie Ammoniak erfordert er jedoch erhebliche Investitionen in die Infrastruktur, insbesondere in Speicherung und Betankungsmöglichkeiten. Wasserstoff hat den zusätzlichen Vorteil, dass er bei der Nutzung keine NOx- oder Feinstaub produziert, was ihn unter Emissionsgesichtspunkten zu einer noch saubereren Alternative macht, obwohl allerdings höhere Vorlaufkosten im Zusammenhang mit seiner Produktion und Verteilung anfallen.

| Kraftstoffart | CO2e (g/MJ) | NOx (g/MJ) | PM (g/MJ) |
|---|---|---|---|
| Diesel | 90.5 | 0.5 | 0.03 |
| Ammoniak | 0.0 | 0.7 | 0.02 |
| Wasserstoff | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Methanol | 20.6 | 0.3 | 0.01 |

Methanol, ein weiterer alternativer Kraftstoff, hat einen geringeren ökologischen Fußabdruck im Vergleich zu Diesel, insbesondere wenn dieser aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird. Das Emissionsprofil von Methanol ist besser als jenes von Diesel, mit deutlich geringeren CO2-, NOx- und Feinstaubemissionen. Allerdings verursacht Methanol immer noch mehr Emissionen als Ammoniak und Wasserstoff, die das Potenzial haben, keine oder nahezu keine Emissionen zu verursachen – abhängig davon wie sie hergestellt und verwendet werden.

Auch die wirtschaftliche Machbarkeit der Einführung dieser Kraftstoffe variiert. Ammoniak erfordert in der Regel geringere Anfangsinvestitionen als Wasserstoff, aufgrund bestehender Produktions- und

[33] http://www.upper-rhine-ports.eu/images/UpperRhinePorts/LNG_MP_Booklet_FINAL.pdf

Verteilungsinfrastruktur, obwohl die Handhabung und Sicherheitsmaßnahmen laufende Kosten verursachen. Methanol, im Vergleich zu Ammoniak weniger komplex in der Lagerung und Handhabung, ist teurer als herkömmlicher Diesel, aber günstiger als Wasserstoff. In Anbetracht der mit diesen Kraftstoffen verbundenen Emissionen und Kosten hängt die Wahl zwischen Ammoniak, Wasserstoff und Methanol weitgehend von der Abwägung der Umweltvorteile gegen die wirtschaftlichen Auswirkungen und die betrieblichen Anforderungen der BS ab. Nachfolgend ein Vergleich der wichtigsten Emissionsfaktoren für Diesel, Ammoniak, Wasserstoff und Methanol.

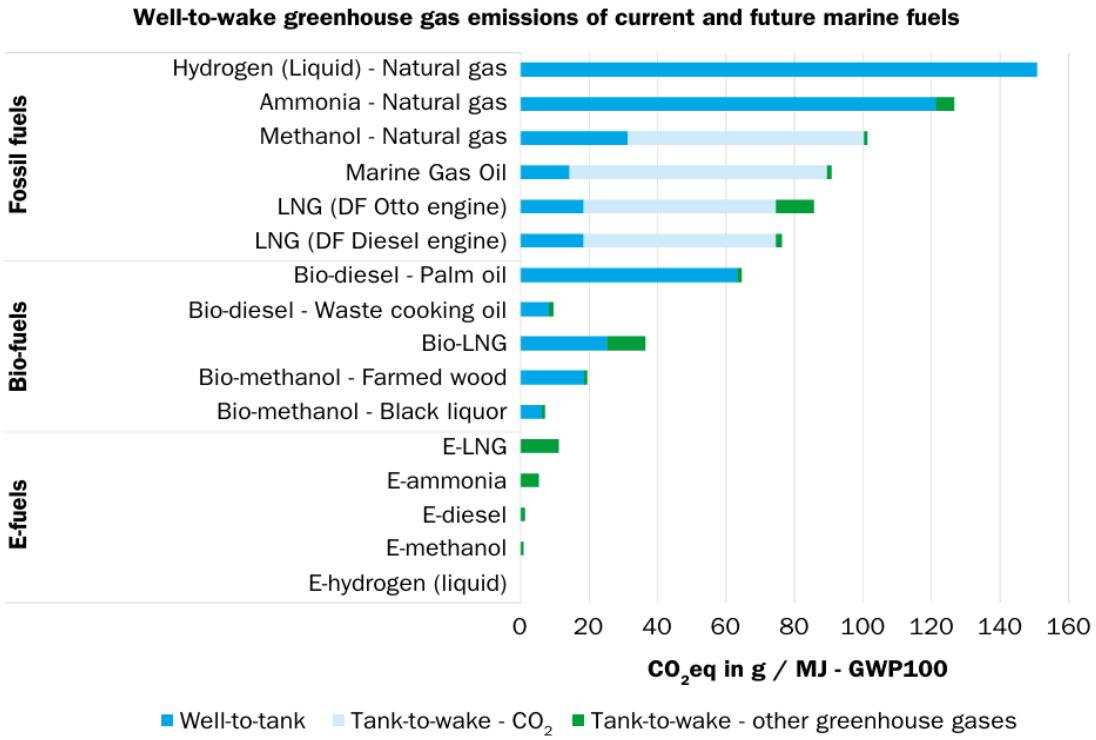



*Bild 4:CO2-äquivalente Emissionen von der Quelle bis zum Verbrauch in g pro MJ für verschiedene Energieträger mit 100-jährigem Treibhauspotenzial*[34]

Die obige Abbildung veranschaulicht die ökologischen Kompromisse zwischen den verschiedenen Kraftstofftypen und hebt die eindeutigen Vorteile von Ammoniak und Wasserstoff in Bezug auf eine Verringerung der CO2-Emissionen hervor, weist aber auch auf die Notwendigkeit hin, die anderen Schadstoffe wie NOx und Feinstaub zu managen, um umfassende Umweltvorteile zu erzielen.

**Ammoniak vs. Wasserstoff**

Sowohl Ammoniak als auch Wasserstoff sind vielversprechende alternative Kraftstoffe für den Transport mit dem Binnenschiff, während sich die Industrie in Richtung Dekarbonisierung bewegt. Allerdings unterscheiden sie sich in einigen Schlüsselaspekten, welche die Eignung für unterschiedliche Anwendungen im Binnenschifffahrtssektor beeinflussen.

1. Energiedichte und Lagerung:

- Ammoniak: Ammoniak hat eine höhere Energiedichte pro Volumen als Wasserstoff, was bedeutet, dass Ammoniak mehr Energie in einem bestimmten Raum speichern kann. Dies ist besonders vorteilhaft für Binnenschiffe, die genügend Treibstoff für lange Fahrten auf Wasserstraßen wie der Donau mitführen müssen. Ammoniak kann in flüssiger Form unter mäßigem Druck oder bei niedrigen Temperaturen gelagert werden. Damit ist der Kraftstoff einfacher zu handhaben als Wasserstoff, für dessen Lagerung extrem hoher Druck oder kryogene Temperaturen erforderlich sind.

[34] TNO: TNO Boek/rapport

- Wasserstoff: Obwohl Wasserstoff eine höhere Energiedichte nach Gewicht hat, ist seine volumetrische Energiedichte viel geringer als die von Ammoniak. Das bedeutet, dass die Speicherung von ausreichend Wasserstoff an Bord eines Schiffes mehr Platz oder komplexe Hochdrucksysteme benötigt, was für Schiffe mit begrenztem Platzangebot ein limitierender Faktor sein kann.

2. Infrastruktur:
- Ammoniak: Die bestehende Infrastruktur für die Handhabung und den Transport von Ammoniak ist weiterentwickelter als jene für Wasserstoff, insbesondere weil der Kraftstoff in der Landwirtschaft bereits in großem Umfang als Düngemittel eingesetzt wird. Diese bestehende Infrastruktur könnte möglicherweise für den Einsatz in der Schifffahrtsindustrie angepasst werden, so dass es einfacher wäre, Ammoniak als Kraftstoff für die BS zu nutzen.
- Wasserstoff: Die Wasserstoffinfrastruktur, insbesondere für die Betankung, befindet sich noch im Anfangsstadium der Entwicklung. Das trifft vor allem für den Binnenschifffahrtssektor zu. Für den Aufbau der erforderlichen Produktions-, Speicher- und Verteilungsnetze für Wasserstoff sind erhebliche Investitionen erforderlich, was seine breite Einführung verzögern könnte.

3. Sicherheit und Handhabung:
- Ammoniak: Ammoniak ist toxisch und korrosiv, was erhebliche Sicherheitsbedenken aufwirft, insbesondere in den engen und stark besiedelten und bevölkerten Umgebungen, die oft mit Binnenwasserstraßen assoziiert werden. Angemessene Sicherheitsmaßnahmen und Handhabungsprotokolle müssen strikt eingehalten werden, um Lecks zu verhindern und die Sicherheit der Besatzung und der Bevölkerung in der Nähe zu gewährleisten.
- Wasserstoff: Wasserstoff ist leicht entflammbar und erfordert eine sorgfältige Handhabung, insbesondere da er aufgrund seiner geringen Molekülgröße dazu neigt, aus Speichersystemen zu lecken. Die fehlende Toxizität von Wasserstoff und die umfangreiche Forschung in Bezug auf die sichere Handhabung verschaffen ihm einen Vorteil gegenüber Ammoniak.

4. Umweltauswirkungen:
- Ammoniak: Bei der Verbrennung von Ammoniak wird kein Kohlendioxid freigesetzt, was es in dieser Hinsicht zu einem kohlenstofffreien Brennstoff macht. Bei der Verbrennung von Ammoniak können jedoch Stickoxide (NOx) entstehen, dies sind schädliche Schadstoffe. Dieses Problem kann durch Nachbehandlungstechnologien wie die selektive katalytische Reduktion (SCR) entschärft werden, aber es macht den Einsatz von Ammoniak als Kraftstoff komplexer.
- Wasserstoff: Wasserstoff-Brennstoffzellen erzeugen Strom, wobei Wasser das einzige Nebenprodukt ist, was bedeutet, dass keine Emissionen am Ort der Nutzung entstehen. Dies macht Wasserstoff aus Emissionen-Perspektive zu einer saubereren Option als, vergleichsweise Ammoniak, insbesondere wenn man die NOx-Produktion berücksichtigt.

5. Adoption und Zukunftsperspektiven:
- Ammoniak: Ammoniaks existierende industrielle Infrastruktur, gepaart mit den Vorteilen der Energiedichte, machen es zu einem geeigneten Kandidaten für eine zeitnahe Adoption im Binnenschifffahrtssektor. Es ist besonders geeignet für Schiffe, die auf längeren Routen betrieben werden, auf denen Tankmöglichkeiten limitiert sind, wie beispielsweise auf der Donau.
- Wasserstoff: Wasserstoff wird als längerfristige Lösung für einen emissionsarmen Verkehr angesehen, insbesondere in Fällen, in denen Infrastruktur entwickelt werden kann, um dessen Nutzung zu unterstützen. Wasserstoff-Brennstoffzellen sind eine attraktive Option für die BS in Gebieten, in denen kürzere Fahrten oder eine leicht zugängliche Betankungsinfrastruktur die Lagerung weniger problematisch machen.

Ammoniak und Wasserstoff haben jeweils unterschiedliche Vorteile für die BS, die Wahl zwischen ihnen

hängt von Faktoren wie der Reichweite, der Schiffsgröße und der Entwicklung der entsprechenden Infrastruktur ab. Ammoniak bietet eine höhere Energiedichte und profitiert von der vorhandenen Infrastruktur, was es zu einer unmittelbareren Lösung für Langstreckenanwendungen macht. Wasserstoff ist mit seinem emissionsarmen Profil und der fortschrittlichen Brennstoffzellentechnologie eine sauberere Option, hat aber mit Problemen bei der Lagerung und der Infrastruktur zu kämpfen, die für eine breite Anwendung überwunden werden müssen.

## 5.2 Einsatzfähigkeit laut ES-TRIN Status

ES-TRIN (Europäische Norm zur Festlegung der technischen Anforderungen an Binnenschiffe) ist entscheidend für den Einsatz neuer Technologien. Diese wurde unter der Aufsicht des Europäischen Ausschusses für die Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI) aus mehreren Gründen entwickelt. ES-TRIN bietet[35] einen harmonisierten Rechtsrahmen, der den sicheren und effizienten Betrieb von Binnenschiffen gewährleistet. Wenn neue Technologien, wie z.B. alternative Antriebssysteme (Wasserstoff, Biokraftstoffe, Batterien) oder autonome Navigation, eingeführt werden, hilft ES-TRIN bei der Festlegung der technischen Normen, die befolgt werden müssen, um Sicherheit zu gewährleisten.
Diese Vorschriften decken kritische Aspekte wie Kraftstofflagerung, Motorenkonstruktion, Brandsicherheit und Emissionskontrolle.

ES-TRIN setzt Leistungs- und Betriebsstandards für moderne Technologien wie Brennstoffzellen, elektrische Antriebssysteme und Hybridmotoren. Durch die Bereitstellung von Leitlinien für die Integration dieser Technologien trägt ES-TRIN zur Modernisierung der Binnenschifffahrtsflotte bei, was zu einer verbesserten Kraftstoffeffizienz und geringeren Emissionen führt. Für alternative Kraftstoffe wie Wasserstoff, Methanol und Ammoniak skizziert ES-TRIN spezifische Anforderungen, die ihre besonderen Eigenschaften, wie niedrige Flammpunkte oder komplexe Lagerungs-anforderungen adressieren. Die Standardisierung gewährleistet, dass neue Kraftstoffe sicher in die Flotte integriert werden, Unfälle vermieden werden, während gleichzeitig der Übergang von herkömmlichen Dieselmotoren auf umweltfreundlichere Alternativen gefördert wird.

Da ES-TRIN in allen europäischen Ländern angewendet wird, werden einheitliche Standards für alle Binnenschiffe gewährleistet. Diese Harmonisierung ist für den grenzüberschreitenden Betrieb von entscheidender Bedeutung und ermöglicht Schiffen die mit neuen Technologien ausgestattet sind, nahtlos durch verschiedene Länder und Wasserstraßen fahren zu können, ohne auf technische Hindernisse zu stoßen. Da neue Technologien in Pilotprojekten getestet werden, ermöglicht ES-TRIN Flexibilität, indem es Ausnahmen und Sonderfälle (z. B. bei Pilotprojekten oder innovativen Schiffen) zulässt. Diese Flexibilität ist der Schlüssel für die Bewertung neuer Technologien in kleinerem Maßstab vor einer breiteren Einführung.

Seit dem ersten Jänner 2024 ist ES-TRIN 2023 in Kraft. Die ES-TRIN 2023 ersetzt die Version von 2021 und stellt einen technischen Anhang für die Europäische Richtlinie ED/2016/1629 dar. ES-TRIN wird periodisch alle zwei Jahre aktualisiert. 2025 wird eine neue Edition entwickelt werden.

**Arbeitsprogramm**
In dem CESNI Arbeitsprogramm (2022-2024)[36] werden alternative Antriebe und Kraftstoffe durch verschiedene Initiativen adressiert. Diese sind darauf ausgerichtet Emissionen zu reduzieren und innovative Technologien in der BS zu fördern:

1. Standards für alternative Kraftstoffe: CESNI arbeitet an der Ausarbeitung und Verabschiedung technischer Normen für die Verwendung alternativer Kraftstoffe auf Binnenschiffen, einschließlich Methanol, Wasserstoff (sowohl verflüssigt als auch gasförmig) und komprimiertem Erdgas (CNG).

[35] ES-TRIN ist nicht per se verbindlich, aber die ZKR, die EU, internationale Organisationen und Staaten können ES-TRIN anwenden, indem sie in ihren jeweiligen Rechtsrahmen darauf verweisen.
[36] https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2023/12/CESNI-work-programme-REV_231213_en.pdf

Diese Normen betreffen die Kraftstoffspeicherung und die Anpassung von Verbrennungsmotoren an alternative Kraftstoffe.
2. Elektrische Antriebssysteme: Die Programme beinhalten eine Überprüfung und Aktualisierung der Anforderungen für elektrische Antriebssysteme, wobei die gewonnen Erfahrungen in dem Sektor berücksichtigt werden. Dies ist ein signifikanter Schritt in Richtung elektrischer Lösungen und Übergang zu emissionsarmen Antrieben.
3. Null-Emission und grüne Technologien: CESNI unterstützt den Einsatz von Batterien und elektrischen Antriebssystemen als Teil der Flottenentwicklung in Richtung des emissionsarmen Betriebs. Die Organisation ermöglicht des Weiteren Innovationen, indem administrative Barrieren in Bezug auf die neuen Technologien reduziert werden.

Die ES-TRIN 2023 beinhaltet einige Änderungen, wovon einige relevant für alternative Kraftstoffe sind. In der ES-TRIN wird Wasserstoff als potenzieller Kraftstoff für Binnenschiffe anerkannt. Allerdings ist der regulatorische Rahmen für deren Verwendung noch in Entwicklung. Anhang 8 der ES-TRIN skizziert Anforderungen für den Umgang mit Kraftstoffen, die, wie Wasserstoff einen niedrigen Flammpunkt haben. Zentrale Herausforderungen umfassen die Gewährleistung einer sicheren Wasserstofflagerung und -bunkerung, sowie Brandschutzprotokolle, die aufgrund der Eigenschaften des Stoffes notwendig sind.

Kapitel 30 (allgemeine Anforderungen für alle Kraftstoffe mit niedrigem Flammpunkt) und Anhang 8 (unterschiedliche Sektionen für die Lagerung und Verwendung verschiedener Kraftstoffe) der ES-TRIN 2023 adressieren diese Bereiche, welche besonders relevant für die Methanol- und Wasserstoffverwendung in der BS sind. Obwohl nicht enthalten in der ES-TRIN 2023, werden Lagerung und Verwendung von Methanol, aller Voraussicht nach, ein Teil der ES-TRIN 2025/1 sein, deren Inkrafttreten für Jänner 2026 erwartet wird.[37]

Der Europäische Ausschuss zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI) arbeitet eng mit verschiedenen internationalen Organisationen zusammen. Unter anderem mit der Zentralkommission der Rheinschifffahrt (ZKR), um technische Standards für die BS zu entwickeln und zu harmonisieren. Während sich die Donaukommission auf die Donauregion fokussiert, stimmt sie ihre Regulierungen und technischen Anforderungen mit den Standards, die von CESNI entwickelt wurden, ab, um Einheitlichkeit auf den europäischen Wasserstraßen sicherzustellen.

CESNI/TP enthält eine temporäre Arbeitsgruppe zu technischen Anforderungen für alternative Kraftstoffe, der Zeitplan kann hier gefunden werden: https://www.cesni.eu/nl/evenements
Richtlinie (EU) 2016/1629.
Die ED/2016/1629, auch bekannt als die Richtlinie (EU) 2016/1629, legt technische Anforderungen für Binnenschiffe fest.

Die neue Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) führt Ziele für das Angebot an Landstrom in Binnenhäfen ein, was direkt die Schiffe beeinflussen wird, die von der ED/2016/1629 abgedeckt sind. Verordnung (EU) 2016/1628, die in Verbindung steht zu der ED/2016/1629, bestärkt die Einführung alternativer Kraftstoffmotoren, die weniger NOx und Feinstaub emittieren. Die Arbeiten um Regulierungen und Standards für die Dekarbonisierung der BS in Europa zu schaffen sind im Gange und werden wahrscheinlich zukünftige Aktualisierungen der ED/2016/1629 beeinflussen.

Die Liste alternativer Kraftstoffe, die in den maritimen Verordnungen berücksichtigt werden könnte in der Zukunft ergänzt werden. Dies suggeriert, dass die ED/2016/1629 sich weiterentwickeln muss, um neue Kraftstofftechnologien aufzunehmen. Da die Richtlinie als technischer Anhang neben der ES-TRIN dient, werden zukünftige Aktualisierungen der ES-TRIN in Bezug auf alternative Kraftstoffe

[37] https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2023/09/6_Secretariat-du-CESNI.pd

voraussichtlich in Änderungen der ED/2016/1629 reflektiert werden.
Während die ED/2016/1629 aktuell keine ausgedehnten Provisionen für alternative Kraftstoffe hat, ist klar, dass die regulatorische Landschaft sich weiterentwickelt, um die wachsende Wichtigkeit nachhaltiger und alternativer Kraftstofflösungen in der BS zu adressieren. Zukünftige Revisionen der Richtlinie werden wahrscheinlich spezifischere Anforderungen und Leitfäden in Bezug auf alternative Kraftstoffe geben, um mit weiteren EU Umwelt- und Energiestrategien konform zu gehen.

## 5.3 RED III und ETS 2

Die „Renewable Energy Directive III“ (RED III) – Erneuerbare-Energien-Richtlinie III – und das „Emissions Trading System II“ (ETS-2) – Emissionshandelssystem II – sind Schlüsselelemente der Strategie der Europäischen Union die Klimaziele zu erreichen und sauberere Energieverwendung zu fördern. Es wird erwartet, dass beide Richtlinien signifikante Auswirkungen auf verschiedene Sektoren haben werden, inklusive der BS, indem diese in Richtung Adaptierung erneuerbarer Energiequellen und Reduktion der Treibhausgasemissionen gelenkt werden.

**RED III (Erneuerbare-Energien-Richtlinie III)**
Die RED-III-Richtlinie, die 2023 verabschiedet wurde, setzt das verbindliche Ziel, dass die EU bis 2030 42,5 % ihrer Energie aus erneuerbaren Quellen zu beziehen hat, wobei die Möglichkeit besteht 45 % zu erreichen, wenn die Bedingungen dies zulassen. Sie zielt darauf ab, den Übergang zu sauberer Energie in allen Sektoren, einschließlich des Verkehrssektors, zu beschleunigen und die Kohlenstoffemissionen durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen, Wasserstoff und anderen erneuerbaren Kraftstoffen zu reduzieren.
Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt:

- Adoption erneuerbarer Kraftstoffe: Die RED III wird die BS zur Umstellung von Diesel auf kohlenstoffarme und erneuerbare Kraftstoffe wie Biokraftstoffe, Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe unterstützen. Dies steht im Einklang mit dem Ziel der EU, bis 2050 kohlenstoffneutral zu werden.
- Erhöhte Nachfrage nach Biokraftstoffen: Mit der Umstellung des gesamten Verkehrssektors, einschließlich der Luft- und Schifffahrt, auf Biokraftstoffe, könnten die Binnenschifffahrtsunternehmen mit steigenden Kosten aufgrund des Wettbewerbs um die Biokraftstoffe konfrontiert werden.
- Zeitplan: Bis 2030 muss die BS auf erneuerbare Kraftstoffe umstellen, um die Ziele der RED III zu erreichen. Dies bedeutet, dass Investitionen in Infrastruktur für alternative Kraftstoffe kurz- bis mittelfristig notwendig sein werden, um Einhaltung und Kosteneffizienz zu gewährleisten.

ETS-2 (Emissions Trading System II)
Das ETS-2, das im Jahr 2027 eingeführt werden soll, weitet den Kohlenstoffbepreisungsmechanismus der EU auf den Straßenverkehr und Gebäude aus . Im Rahmen dieses Systems werden die Kohlenstoffemissionen in diesen Sektoren gedeckelt, und Unternehmen werden für jede Tonne $CO_2$, die sie ausstoßen, Genehmigungen kaufen müssen. Obwohl ETS-2 die BS nicht direkt betrifft wird es indirekte Auswirkungen haben.
Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt:

- Indirekter Kostendruck: Obwohl nicht direkt von ETS-2 betroffen, könnte sich der Binnenschifffahrtssektor mit steigenden Betriebskosten konfrontiert sehen, da die Logistik- und Lieferketten, die auf den Straßentransport auf der letzten Meile angewiesen sind, aufgrund der Kohlenstoffpreise teurer werden.
- Höhere Kraftstoffpreise: Da der Straßenverkehr mit steigenden Kosten für die Verwendung von Diesel und anderen kohlenstoffintensiven Kraftstoffen konfrontiert ist, könnte sich dies auch auf die Kosten der BS auswirken, was traditionelle Kraftstoffe teurer machen und die Schifffahrtsunternehmen zu erneuerbaren Alternativen drängen.
- Langfristige Auswirkung: Der allmähliche Anstieg der Kohlenstoffpreise aufgrund der ETS-2 wird die BS weiter dazu führen, sauberere Kraftstoffe und Technologien bis zum Ende des Jahrzehnts zu adoptieren.

Sowohl die RED III-Richtlinie als auch die ETS-2 werden eine entscheidende Rolle spielen, wenn es darum geht, den Binnenschifffahrtssektor in Richtung Nachhaltigkeit zu führen. RED III wird den Sektor direkt dazu bringen bis 2030 auf erneuerbare Kraftstoffe umzustellen, während ETS-2 indirekt die Kosten für kohlenstoffintensive Kraftstoffe ab 2027 erhöhen und damit Anreize für den Umstieg auf emissionsarme Technologien schaffen wird.

# 6. Schlussfolgerung und Handlungsempfehlungen: Den Weg in die Zukunft ebnen

Ein erfolgreicher Übergang zu nachhaltigen Antriebssystemen erfordert klare und umsetzbare Strategien. In diesem Kapitel skizzieren wir kurz- und langfristige Strategien für die Einführung alternativer Antriebstechnologien in der Donaugüterschifffahrt.

Unsere Empfehlungen werden sowohl technische als auch politische Maßnahmen abdecken und bieten einen umfassenden Fahrplan für die Beteiligten. Durch das Anbieten praktischer Schritte und politischer Leitlinien soll dieses Kapitel dazu beitragen die Umsetzung nachhaltiger Antriebssysteme in der Region voranzutreiben.

**Ökonomische Faktoren**
Mit der derzeitigen Praxis der Modernisierung der Donauflotte durch den Ankauf von Binnenschiffen, die in Westeuropa ausgemustert oder kurz vor dem Ende ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer stehen, ist das Erreichen des Null-Emissions-Ziels bis 2050 gefährdet. Während ältere Schiffe aus Westeuropa kurzfristig wirtschaftliche Vorteile im Vergleich zu der alternden Flotte (viele Schiffe sind über 40 Jahre alt) bringen, verzögert dieser Ansatz die Anreize für den Übergang zu emissionsarmen Schiffen.

- Da umfangreiche Subventionen in Westeuropa die Einführung von emissionsarmen Schiffen beschleunigen, wird sich die Flottenzusammensetzung bis 2030 ändern, wobei mehr Schiffe mit Null-Emissionen in Betrieb sein werden. Die älteren Schiffe die ersetzt werden, werden wahrscheinlich ihren Weg in die Donauflotte finden.
- Diese relative Modernisierung könnte durch Drop-in-Kraftstoffe ergänzt werden, da die neuen Eigentümer kaum in kostspielige Umrüstungen investieren werden, die den Wert des Schiffes übersteigen.
- Höhere Beimischungen und eine regionale Produktion dieser Kraftstoffe, sowie die notwendige technische Wartung, stellen eine unbedenkliche Option dar, die im Vergleich zu anderen Wegen nur minimale infrastrukturelle Veränderungen erfordert.

Ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor ist der Vergleich zwischen Dieselpreisen und alternativen Kraftstoffen, da Größenvorteile durch eine höhere Produktion und Nachfrage erwartungsgemäß niedrigere Kosten für alternative Kraftstoffe bedeuten. Umgekehrt werden die Dieselpreise wahrscheinlich aufgrund der Auswirkungen größerer Programme wie ETS-2 und RED III steigen. Die Auswirkungen auf einzelne Unternehmen[38] sind noch unklar. Der Dialog mit den Branchenverbänden ist von entscheidender Bedeutung, um die Unterstützung für die langfristigen Ziele innerhalb der Industrie zu sichern.

**Technische Machbarkeit**
Vielversprechende Null-Emissions-Lösungen wie Ammoniak, Methanol und Wasserstoff unterscheiden sich in ihrem Technologie-Reifegrad (TRL).

- Ammoniak ist aufgrund von Schiffsdesigneinschränkungen und Bedenken hinsichtlich der Toxizität kurzfristig nicht einsetzbar.

[38] Auch die Eigentumsverhältnisse spielen eine Rolle bei der Modernisierung des Fuhrparks. So haben unabhängige Eigentümer, die kurz vor dem Ruhestand stehen, möglicherweise wenig Anreiz in langfristige Nachhaltigkeitsziele zu investieren, während Flotteneigentümer möglicherweise andere Motivationen haben.

- Methanolanwendungen sind zwar vielversprechend, stecken aber im Vergleich zu Wasserstoff noch in den Kinderschuhen.
- Wasserstoff wird allgemein als mittelfristige Lösung anerkannt, obwohl es noch Herausforderungen in Bezug auf Energiedichte und Infrastrukturanforderungen gibt. Für eine optimale Nutzung von Wasserstoff ist ein robustes Netz von unterstützender Infrastruktur erforderlich. Häfen sollten entsprechend aufgerüstet werden.
    - Austauschbare Container stellen eine praktikable Lösung dar. Sie ermöglichen eine kostengünstigere Wasserstoffversorgung durch Containerumschlagplätze, die mit angemessenen Sicherheitsmaßnahmen ausgestattet sind.
    - In Regionen mit weniger Anlagen kann die Wasserstoffversorgung die Integration mit industriellen Pipelines oder die Einrichtung zusätzlicher strategischer Wasserstoffdepots erfordern.

Der elektrische Antrieb ist dagegen weniger geeignet. Er funktioniert gut im Westen, wo der Energiebedarf aufgrund der Kanalschifffahrt geringer ist. Doch in Regionen mit stärkeren Strömungen, wie im Donaudelta, ist der Energiebedarf für Schubverbände zu hoch um die Kosten für einen elektrischen Antrieb zu rechtfertigen.

**Regulatorische Rahmenbedingungen**
Ein starker Rechtsrahmen und das Management von Interessengruppen sind von entscheidender Bedeutung. Institutionen wie die Donaukommission können eine unterstützende Rolle spielen. Aufgrund einer steigenden Dringlichkeit ist es entscheidend eine Fragmentierung zu vermeiden. Anders als der Rhein profitiert die Donau von der Positionierung mehrerer Hauptstädte entlang des Gewässers, was ihr mehr Sichtbarkeit und politische Aufmerksamkeit verleiht. Allerdings ist aufgrund der relativ geringen Anzahl von Schiffsbewegungen die BS nicht immer so sichtbar, wie sie sein sollte.

- Investitionen in Öffentlichkeitsarbeit und sektorübergreifende Zusammenarbeit (z. B. mit der Kreuzfahrtindustrie) könnten die Sichtbarkeit verbessern und zu mehr politischer Dringlichkeit führen. Die Stärkung der regionalen Zusammenarbeit, ähnlich dem RH2INE-Modell, könnte ebenfalls von Vorteil sein.
- Der Wettbewerb um europäische Mittel für die notwendige Infrastruktur, unterstützt durch vorherige Studien, wird der Schlüssel zum Erfolg sein. Ein starker intermediärer Bereich, mit Spezialisten, die mit Brüssel und der Verwaltung von Fördermitteln vertraut sind, ist von entscheidender Bedeutung.
- Da alternative Antriebssysteme und -kraftstoffe immer mehr an Bedeutung gewinnen wird die BS mit einem stärkeren Wettbewerb mit anderen Sektoren, wie dem Luftverkehr, um Biokraftstoffe konfrontiert. Die Marktdynamik könnte die Kraftstoffpreise erhöhen und die Gewinnspannen verringern, was Schiffseigner angreifbar macht und langfristig die Kontinuität des gesamten Sektors bedroht. Daher müssen gleiche Wettbewerbsbedingungen gewährleistet werden.

Angesichts der Größe der Donauflotte (mehrere hundert bis über tausend Schiffe, je nach Quelle), könnte ein maßgeschneiderter Ansatz erforderlich sein. Gespräche mit den wichtigsten Schiffseignern (z.B. Schubverbände) könnten dazu beitragen die spezifischen technischen und wirtschaftlichen Bedürfnisse der Flotte zu ermitteln und so den Weg für gezielte Anträge für europäische Fördermittel ebnen. Spezialisierte Berater könnten detaillierte Einblicke und umsetzbare Ratschläge geben.

Das Erkennen der Verteilung der Flotte über verschiedene Länder - wobei Rumänien eine wichtige Rolle spielt - könnten Diskussionen über eine gezieltere Unterstützung in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden anstoßen. Größere Städte und Häfen könnten ebenfalls eine nützliche Rolle spielen, indem sie Anreize für umweltfreundlichere Schiffe bieten.

**Der Weg vorwärts**
Erhebliche Investitionen sind erforderlich, um den Donauraum für den Antrieb mit alternativen Kraftstoffen vorzubereiten. Investitionen auf dem Wasser (Schiffe) und an Land (Infrastruktur) werden für den Übergang entscheidend sein. Ein entscheidender Aspekt dieser Entwicklung wäre der Ausbau der Hafenanlagen zur

Unterstützung einer Wasserstoff-Tanktainer-Pool-Infrastruktur. Wichtige Kandidatenhäfen für diesen Zweck sind Komárom und Esztergom (von Bratislava nach Budapest), Smederevo, Veliko Gradište und Kladovo (Belgrad bis Drobeta-Turnu Severin), Lom und Svishtov (Vidin bis Ruse), sowie Călărași und Brăila (Giurgiu bis Galati). Diese Häfen, die strategisch günstig in großen Lücken liegen, haben das Potenzial für die Entwicklung einer durchgängigen Infrastruktur für den Containerumschlag, etwa alle 200 Kilometer entlang des Korridors.

Der Aufbau der notwendigen Infrastruktur für alternative Energien steht vor komplexen Genehmigungshindernissen und regulatorischen Barrieren. Diese Vorschriften unterscheiden sich je nach Region und Land, was zu fragmentierten Prozessen führt, welche die Entwicklung verlangsamen. Um die Energiewende zu erleichtern besteht ein dringender Bedarf an harmonisierter Politik in ganz Europa, insbesondere für die Genehmigung und den Bau von Bunkeranlagen, Ladestationen und anderen wichtigen Infrastrukturen für saubere Energie.

Die Nachfrage nach alternativen Energieinfrastrukturen von Schiffsbetreibern ist aufgrund der hohen Vorlaufkosten für das Umrüsten von Schiffen und der Ungewissheit über die Zuverlässigkeit der neuen Energienetze weiterhin niedrig. Es besteht eine signifikante Investitionslücke, die überbrückt werden muss, um die notwendige Infrastruktur zu schaffen. Regierungen und private Akteure müssen zusammenarbeiten, um Finanzinstrumente und Anreize zu schaffen, welche die Entwicklung eines sauberen Energienetzes für die BS beschleunigen können. Diese Investitionen sind für die Erreichung der Dekarbonisierungsziele der Europäischen Union vital.

Lang- und kurzfristige Optionen:

- Wasserstoff und Methanol bieten das Potenzial für eine langfristig emissionsarme Schifffahrt, erfordern allerdings erhebliche Investitionen in Elektrolyseure, Speicher- und Sicherheitssysteme.
- Nahezu Null-Emissionen würden weniger kosten. Biokraftstoffe, wenngleich leichter in existierende Infrastruktur zu integrieren, machen nichtsdestotrotz Upgrades in Lager- und Distributionsanlagen erforderlich. Eine Kombination aus HVO100 und Stage V kann die Ziele 2049 heute erreichbarer machen und ist ein vielversprechender Weg in die Zukunft. Die dadurch entstehenden neuen Abhängigkeiten mit Lieferanten muss man dennoch im Kopf behalten.

Ob die unterschiedlichen Investitionen gerechtfertigt sind, ist Gegenstand einer weiteren Konsultation der Interessengruppen.

Einige weitere Anmerkungen:

- Starke Führung und Stakeholder-Management sind entscheidend. Bestehende Institutionen wie die Donaukommission sollten den Prozess erleichtern. Mit zunehmender Dringlichkeit sollte eine Fragmentierung vermieden werden.
- Die Sichtbarkeit der BS kann durch Öffentlichkeitsarbeit verbessert werden, insbesondere in Zusammenarbeit mit der Kreuzfahrtindustrie.
- Die Sicherung der europäischen Finanzierung für die Infrastruktur ist entscheidend. Dies erfordert qualifizierte Vermittler, die mit Brüssel und Förderverfahren vertraut sind.
- Die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Verkehrssektor wird zunehmend wichtiger, da sich die Marktdynamik ändert. Die Preise für Biokraftstoffe könnten aufgrund des Wettbewerbs mit anderen Sektoren, wie dem Luftverkehr, steigen.

Indem sich diesen Herausforderungen durch maßgeschneiderte und strategische Planung gestellt wird, kann sich die Donau-Flotte in eine umweltfreundlichere Zukunft bewegen, die sich an langfristige Emissionsreduktionsziele anpasst.

Zusammenfassung

| Antrieb | Technische Machbarkeit | Ökonomische Machbarkeit | Soziale Auswirkungen | Regulatorische Einsatzbereitschaft |
|---|---|---|---|---|
| **Biokraftstoffe (HVO, FAME)** | + (bewiesen, einfache Integration) | + (finanziell tragbar, einige Bedenken hinsichtlich der Versorgung) | ++ (der Industrie bekannt, minimale Umschulung) | + (Biokrafstoffmandate existieren, aber benötigen Nachhaltigkeitsfokus) |
| **Elektrische Antriebe** | + (hohe Effizienz, gut für kurze Routen) | 0 (hohe Anfangsinvestition, aber niedrige Betriebskosten) | + (verbessert Luftqualität, aber benötigt neue Infrastruktur) | 0 (einige Unterstützung, aber Ladeinfrastruktur notwendig) |
| **Wasserstoff** | (bewiesen, aber Lager- und Sicherheitsbedenken) | - (hohe Produktionskosten, limitierte Infrastruktur) | 0 (benötigt signifikante Umschulungen, Sicherheitsbedenken) | + (unterstützende Regulatorien am Aufkommen, aber ein Mangel an Infrastruktur) |
| **Methanol** | ++ (einfaches Umrüsten, gute Lagereigenschaften) | + (niedrigere Kosten im Vergleich zu anderen Alternativen, aber erneuerbares Methanol ist teurer) | + (einfachere Einführung, aber Bedenken in Bezug auf Toxizität) | + (aufkommende Unterstützung, weitgehende Adoption möglich) |
| **Ammoniak** | 0 (hohe Toxizität, Lager- und Umschlagherausforderungen) | - (teure Infrastruktur, nicht weithin verfügbar) | -- (siginifikante Sicherheitsprobleme, umfangreiche Umschulungen erforderlich) | 0 (regulatorische Rahmenbedingungen noch am Entwickeln) |

Impressum
Autor: Erwin van der Linden MSc
Kontakt: erwin@aristoi.eu

Beauftragt von:
viadonau, www.viadonau.org
Zeitrahmen: August – Oktober 2024

Spezielles Dankeschön: Milica Nikolic, Bettina Matzner, Cristian Chirita, und Juha Schweighofer von viadonau.

Copyright-Hinweis:
Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Veröffentlichung darf in irgendeiner Form oder mit irgendwelchen Mitteln, einschließlich Fotokopien, Aufzeichnungen oder anderen elektronischen oder mechanischen Methoden ohne vorherige schriftliche Genehmigung des Autors oder von viadonau vervielfältigt oder übertragen werden, außer im Falle von kurzen Zitaten in kritischen Rezensionen und bestimmten anderen nicht-kommerziellen Verwendungen, die nach dem Urheberrecht zulässig sind.