

FRAUNHOFER-CENTER FÜR MARITIME LOGISTIK UND DIENSTLEISTUNGEN, CML

KLIMANEUTRALE SCHIFFFAHRT AUF DEM BODENSEE

Abschlussbericht

STUDIE KLIMANEUTRALE SCHIFFFAHRT AUF DEM BODENSEE

Abschlussbericht

Nils Hagemeister, Tobias Reidl, Ching Nok Au, Jona Buchholz, Hans-Christoph Burmeister

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen, CML
in Hamburg.

Projektnummer: 11-37545-3570-15072

Datum: 03.12.2025

Projektpartner: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Inhalt

Executive Summary	8
1 Einleitung.....	10
2 AP1: Ist-Analyse, Fahrprofile und Potenziale	11
2.1 Fahrprofile	11
2.1.1 Exkurs: AIS	12
2.1.2 Auswahl der Datenquellen	12
2.1.3 Datenanalyse	13
2.1.3.1 Geofencing	13
2.1.3.2 Datenprüfung.....	14
2.1.3.3 Analyse & Vergleich der Flottenstrukturen	15
2.1.3.4 Extraktion der Fahrprofile	17
2.1.3.5 Vergleich mit der Vorgängerstudie	24
2.2 Ist-Zustand	25
2.2.1 Methodik	25
2.2.1.1 Widerstandsschätzung	25
2.2.2 Jährlicher Energieverbrauch und Emissionen	28
2.2.2.1 Szenario 1: Geschwindigkeitsprofile	28
2.2.2.2 Szenario 2: Höchstgeschwindigkeit	29
2.2.3 Effekt von Leistungsbeschränkungen	30
2.2.4 Eignung Elektroantrieb.....	32
2.3 Initiale Dekarbonisierungsalternativen	35
2.4 Zusammenfassung AP1	36
3 AP2: Kraftstoffalternativen und Infrastruktur	38
3.1 Einordnung der ausgewählten klimaneutralen Energieträger.....	38
3.1.1 Klassifizierung der Energieträger	38
3.1.1.1 Wasserstoff	38
3.1.1.2 Methanol	39
3.1.1.3 Ammoniak	40
3.1.1.4 HVO	42
3.1.2 Verfügbarkeit der Energieträger	43
3.1.2.1 Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und Methanol	43
3.1.2.2 Verfügbarkeit von HVO	44
3.1.3 Kostenschätzung für nachhaltige Energieträger	44
3.1.4 Emissionsbilanz	46
3.1.5 Qualitative Bewertung ausgewählter Energieträger	48
3.2 Alternative Antriebstechnologien	49
3.2.1 Antriebssysteme.....	49
3.2.1.1 Verbrennungsmotor	49
3.2.1.2 Hybride Antriebssysteme	50
3.2.1.3 Voll-elektrisches Antriebssystem	52
3.2.2 Speichertechnologien und Bereitstellung.....	53
3.2.3 Investitionskosten für Antriebs- und Speichersysteme.....	56
3.2.4 Qualitative Bewertung der Antriebssysteme	57
3.3 Infrastrukturkonzepte für alternative Kraftstoffe	60
3.3.1 Aufbau und sicherheitstechnische Aspekte von Tankinfrastrukturen	60
3.3.2 Verfügbarkeit von Infrastruktur zur landseitigen Betankung	63
3.3.3 Berechnung der nötigen Netzanschlusskapazitäten für Elektromobilität	64
3.3.4 Kosten Infrastruktur	66
3.3.5 Qualitative Bewertung der landseitigen Infrastruktur.....	68
3.4 Bewertung alternativer Technologien	69
3.4.1 Allgemeine Einordnung alternativer Technologien.....	69
3.4.2 Differenzierte Bewertung alternativer Technologien für den Einsatz auf dem Bodensee	71

4	AP 3: Schiffs- und bootsbauliche Implikationen.....	73
4.1	Dekarbonisierungsalternative 1: Batterieelektrischer Antrieb	73
4.1.1	Bewertung des Antriebs.....	73
4.1.2	Installations- Und Transformationskostenschätzung	74
4.1.3	Bewertungsmatrix.....	76
4.2	Dekarbonisierungsalternative 2: Brennstoffzellenhybridantrieb.....	76
4.2.1	Bewertung des Antriebs.....	76
4.2.2	Installations- Und Transformationskostenschätzung	77
4.2.3	Bewertungsmatrix.....	78
4.3	Zusammenfassung AP3	79
5	AP4: Szenarioanalyse und Handlungsempfehlungen.....	80
5.1	Handlungsempfehlungen Sportboote:.....	82
5.1.1	Ladeinfrastruktur für Sportboote verfügbar machen und ausbauen.....	82
5.1.2	Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen für die Nutzung von klimaneutralen Antrieben am Bodensee (Klimabeitrag Bodensee).....	82
5.1.3	Überprüfung der Notwendigkeit einer Rezertifizierung von Sportbooten nach Umbauten	84
5.1.4	Untersuchung bidirektionales Laden und Regelleistungsbereitstellung.....	84
5.1.5	Durchführen einer begleitenden Sensibilisierungskampagne	85
5.2	Handlungsempfehlungen Berufsschifffahrt	85
5.2.1	Umstieg auf HVO als Übergangstechnologie	85
5.2.2	Implementierung von batterieelektrischen Antrieben für die kommerzielle Schifffahrt	85
5.2.3	Nutzung von Förderprogrammen für den Energieträgerwechsel in der Berufsschifffahrt.....	86
5.3	Zeitpläne.....	86
5.3.1	Sportboote.....	86
5.3.2	Berufsschifffahrt.....	88
5.4	Zusammenfassung AP4:	90
6	Referenzen.....	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Methodikübersicht AP1	11
Abbildung 2-2: Grenzen des Ijsselmeers.	13
Abbildung 2-3: Grenzen des Vänern.....	14
Abbildung 2-4: Grenzen des Vättern.	14
Abbildung 2-5: Vergleich der Schiffslängenverteilungen aus AIS-Daten und Schiffsregistern.	15
Abbildung 2-6: Bootregister und AIS-Daten: Vergleich des Längen-Breiten-Verhältnisses zwischen den Flotten aus AIS-Daten und Schiffsregistern	16
Abbildung 2-7: Anteil von Motorbooten und Segelbooten in den Schiffsregistern des Bodensees (links) sowie Anteil von Pleasure Craft and Sailing Vessels im AIS-Datensatz (rechts).	17
Abbildung 2-8: Anteil von Verdränger- und Gleitrümpfen im Schiffsregister St. Gallen.	17
Abbildung 2-9: Geschwindigkeitsprofile als Häufigkeitsverteilung der Froude-zahlen für die AIS-Kategorien Sailing Vessel und Pleasure Craft in den betrachteten Revieren.	19
Abbildung 2-10: Exemplarische Geschwindigkeitsprofile für die am häufigsten registrierte Bootsgröße, die durchschnittliche Bootsgröße und die 90. Und 99. Größenpercentile bei Motorbooten	20
Abbildung 2-11: Exemplarische Geschwindigkeitsprofile für die am häufigsten registrierte Bootsgröße, die durchschnittliche Bootsgröße und die 90. Und 99. Größenpercentile bei Segelbooten	20
Abbildung 2-12: Zurückgelegte Gesamtstrecke aller Boote pro Stunde in AIS-Daten	21
Abbildung 2-13: AIS-Daten Gesamtstrecke pro Tag im Jahresverlauf 2023.	22
Abbildung 2-14: AIS-Daten Gesamtstrecke pro Woche im Jahresverlauf 2023.	22
Abbildung 2-15: Häufigkeitsverteilung der Gesamtdistanzen pro Boot pro Tag in AIS- Daten.	23
Abbildung 2-16: Häufigkeitsverteilung der Gesamtdistanzen pro Boot pro Jahr in AIS- Daten.	24
Abbildung 2-17: Geschätzter Kraftstoffverbrauch pro Jahr bei Anwendung der ermittelten Fahrprofile.	28
Abbildung 2-18: Geschätzte CO ₂ -Emissionen pro Jahr bei Anwendung der ermittelten Fahrprofile.	29
Abbildung 2-19: Geschätzter Kraftstoffverbrauch pro Jahr für Szenario Höchstgeschwindigkeit	30
Abbildung 2-20: Geschätzte CO ₂ -Emissionen pro Jahr für Szenario Höchstgeschwindigkeit.	30
Abbildung 2-21: geschätzter Energiebedarf und Anzahl betroffener Boote für per Leistungsgewicht definierte Leistungsbeschränkungen	32
Abbildung 2-22: Anteil von Motorbooten und Segelbooten mit und ohne E-motor in den Schiffsregistern des Bodensees.	32
Abbildung 2-23: Häufigkeit benötigter Batteriekapazitäten für Tagesdistanz bei Anwendung des Geschwindigkeitsprofils	33
Abbildung 2-24: Häufigkeit benötigter Batteriekapazitäten für Tagesdistanz bei Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit	34
Abbildung 3-1: Herstellungsrouten von grünem Wasserstoff	39
Abbildung 3-2: Herstellung von Methanol mit CO / CO ₂ aus Carbon Capture und grünem Wasserstoff	40
Abbildung 3-3: Herstellung von Ammoniak aus grünem Wasserstoff und Stickstoff aus Lufterlegung	41
Abbildung 3-4: Herstellung von HVO aus grünem Wasserstoff und biogenen Abfallstoffen	42
Abbildung 3-5: Emissionen während des Lebenszyklus ausgewählter Kraftstoffe in g CO ₂ eq/MJ	47

Abbildung 3-6: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Verbrennungsmotor; eigene Darstellung nach [54]; Wirkungsgrad aus [24], [54], [55]	50
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Hybridelektrisch mit Verbrennungsmotor und Akkumulator; eigene Darstellung nach [35]; Wirkungsgrad aus [11], [35], [36].....	51
Abbildung 3-8: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Hybridelektrisch mit Brennstoffzelle und Akkumulator; eigene Darstellung nach [35]; Wirkungsgrad aus [11], [35], [36].....	52
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Voll-elektrisch; eigene Darstellung nach [35]; Wirkungsgrad aus [11], [35], [36].....	53
Abbildung 3-10: Vergleichende Darstellung der gravimetrischen und volumetrischen System-Energiedichten ausgewählter Speichersysteme nach [68]	56
Abbildung 3-11: Schematischer Aufbau einer Wasserstoff-Tankinfrastruktur nach [74]	60
Abbildung 3-12: Ereignisbaum für den unkontrollierten Austritt von Wasserstoff [75].....	61
Abbildung 3-13: Gefahrenbereiche (Hazard-Zones) einer Wasserstoff-Tankanlage inkl. Anlieferungsstandort und Zapfanlage [75]	62
Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau einer konventionellen Tankinfrastruktur nach [79].....	63
Abbildung 5-1: Zeitplan für Umsetzung der Handlungsempfehlungen für die Sportboote.....	87
Abbildung 5-2: Erwarteter Verlauf der Emissionen bei Umsetzung des Plans für die Sportboote.....	88
Abbildung 5-3: Zeitplan für Umsetzung der Handlungsempfehlungen für die Berufsschiffahrt.....	89
Abbildung 5-4: Erwarteter Verlauf der Emissionen bei Umsetzung des Plans für die Berufsschiffe	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich der Flächen, größten Ausdehnungen, Bootsanzahl und Anzahl an AIS-Signale von Bodensee, IJsselmeer, Vänern und Vättern.....	13
Tabelle 2-2: Vergleich der Fahrtzeiten mit der Vorgängerstudie	24
Tabelle 2-3: Energieumwandlungseffizienzen (Tank-to-Wheel) unterschiedlicher Motoren	27
Tabelle 2-4: Emissionsfaktoren und Heizwerte verschiedener Treibstoffe	27
Tabelle 2-5: Effekte absoluter Leistungsbeschränkungen	31
Tabelle 2-6: Exemplarische (Durchschnitts-)Geschwindigkeiten und elektrische Energiebedarfe für eine Tagesdistanz für ausgewählte Motorbootsgößen am Bodensee	34
Tabelle 2-7: Exemplarische (Durchschnitts-)Geschwindigkeiten und elektrische Energiebedarfe für eine Tagesdistanz für ausgewählte Segelbootsgößen am Bodensee	34
Tabelle 3-1: Preise ausgewählter Kraftstoffe bezogen auf Gewicht und Energie des Primärenergieträgers (Stand: Juli 2025)	45
Tabelle 3-2: Emissionswerte ausgewählter Kraftstoffe	47
Tabelle 3-3: Fortsetzung – Emissionswerte ausgewählter Kraftstoffe und elektrischer Energie	48
Tabelle 3-4: Qualitative Bewertung ausgewählter Kraftstoffe.....	49
Tabelle 3-5: Zentrale Kennwerte ausgewählter Energieträger und Speichertechnologien	54
Tabelle 3-6: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte ausgewählter Energieträger und Speichertechnologien	55
Tabelle 3-7: Spezifische Investitions- und Operationskosten ausgewählter Energiewandler und Speichersysteme	57
Tabelle 3-8: Qualitative Bewertung der Antriebs- und Speichertechnologien	59
Tabelle 3-9: Aufgeschlüsselte Kosten für eine Wasserstoff-Tankinfrastruktur nach [71].....	67
Tabelle 3-10: Kosten und Verteilung der Ladeanschlüsse an Liegeplätzen oder stationär nach [84]	68
Tabelle 3-11: Qualitative Bewertung der landseitigen Tankinfrastruktur ausgewählter Energieträger	69
Tabelle 3-12: Annahme der Kosten für die resultierende Antriebsleistung der betrachteten Antriebstechnologien	69
Tabelle 3-13: Qualitative Bewertung alternativer Kraftstoffe zum Einsatz am Bodensee	70
Tabelle 3-14: Zusammenfassen der Vor- und Nachteile alternativer Technologien für den Einsatz auf dem Bodensee in Freizeit- und Berufsschifffahrt	72
Tabelle 4-1: Durchschnittswerte und Werte für 99. Und 90. Percentile der installierten Motorleistung und Batteriekapazität für Investitionskosten für Elektromotoren und Batterien pro Boot	75
Tabelle 4-2: Bewertungsmatrix batterieelektrischer Antrieb	76
Tabelle 4-3: Durchschnittswerte und Werte für 99. und 90. Percentile der installierten Motorleistung und Batteriekapazität für Investitionskosten für Elektromotoren, Batterien, Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher pro Boot.....	77
Tabelle 4-4: Bewertungsmatrix Brennstoffzellenhybridantrieb.....	78
Tabelle 5-1: Klimabeitrag Bodensee im Zeitverlauf und erwartet Beiträge für durchschnittliches Schiff sowie für jenes des 90. Und 99 Percentils	84

Executive Summary

Für den Bodensee ist ein klimaneutraler Verkehr die erklärte Zukunftsvision der Anrainerstaaten. Dies bedingt eine Reduktion der Treibhausgasemissionen der Berufs- und Freizeitschifffahrt.

Status Quo Emissionen der Bodenseeflotte

Die Berufsschifffahrt auf dem Bodensee konsumiert jährlich knapp 7.200m³ an Treibstoff mit entsprechenden Emissionen. Zusätzlich sind noch 36.000 Sportboote auf dem Bodensee registriert. Deren Verbrauch wurde mit Bewegungsdaten aus Vergleichsrevieren und empirischen Schiffsmodellen hochgerechnet, wobei diese Vergleichsdaten primär repräsentativ für Segelboote und Verdrängermotorboote sind. Für Gleiter wurden auf Basis der ermittelten Fahrprofile Annahmen für die Geschwindigkeit getroffen, sodass sich ein Korridor der gesamten CO₂-Emissionen am Bodensee zwischen 20.000t und 27.000t jährlich ergibt. Der Großteil der Emissionen wird dabei durch die Berufsschifffahrt verursacht – ca. 66 – 95% je nach Fahrprofil. Leistungsbeschränkungen auf 500kW bzw. 250kW hätten dabei keinen bzw. einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Emissionen.

Klimaneutrale Antriebe

Als alternative Energieträger kommen Wasserstoff, Methanol, Ammoniak, HVO und elektrische Energie in Betracht. Ammoniak ist am Bodensee wegen der Umweltwirkung bei unkontrollierten Austritten keine plausible Option. Methanol hingegen besitzt eine ungewisse Verfügbarkeit vermutlich in Verbindung mit hohen Treibstoffkosten. HVO ist als Übergangstechnologie geeignet mit geringem Aufwand und existierender Infrastruktur Emissionen kurzfristig zu senken, muss aber für eine vollständige Klimaneutralität ebenfalls ersetzt werden. Zudem ist es inkompatibel mit den bei Sportbooten verbreiteten Benzinmotoren. Die einzig verfügbare klimaneutrale Option ist daher der batterieelektrische Antrieb, wobei jedoch die Energiedichte und Batterieinstallation Herausforderungen mit sich bringt. Perspektivisch kann grüner Wasserstoff die Nachteile des batterieelektrischen Antriebs bei Reichweite und Masse ausgleichen, erfordert aber deutlich höhere Investitionen und ist mit höheren Betriebskosten verbunden.

Flottenkompatibilität

Es kann davon ausgegangen werden, dass Elektromotoren mit bestehenden Antriebssträngen häufig kompatibel sind. Im Bereich der Segelboote, wo 95% der Flotte bereits aktuell lediglich Maschinenleistungen von unter 21kW besitzen, ist diese Umstellung am einfachsten mit wenig Veränderungsbedarf bei der Nutzung. Im Bereich der Motorboote ist es für ungefähr die Hälfte der Motorboote mit aktuellen Maschinenleistungen von unter 45kW kurz- bis mittelfristig vergleichsweise einfach eine Elektrifizierung zu vollziehen. Auf Basis der ermittelte typische Tagesdistanz von etwa 60km ist bei dem unterstellten Fahrprofil bereits eine Batteriekapazität von bis zu 15kWh ausreichend für zwei Drittel der Bestandsflotte. Im Segment der luxuriösen hochmotorisierten Yachten und Gleiter ist bei klimaneutraler Elektrifizierung von Bestandsbooten jedoch ein stärker angepasstes Nutzungsverhalten notwendig, wenn man die Umrüstkosten im Rahmen halten möchte. Für die Berufsschifffahrt sind elektrifizierte Designs im Neubaubereich eine technisch machbare Option, die in anderen Revieren auch bereits erprobt sind. In Einzelfällen kann hier eine Kombination mit Wasserstoffbrennstoffzellen je nach Anwendungsfall relevant sein.

Infrastruktur

In Bezug auf die Infrastruktur beträgt die für die Elektrifizierung der gesamten Flotte benötigten Ladeleistung am Bodensee je nach Szenario 50MW bis 80MW. Die Kosten für die Elektrifizierung der Marinas für die Sportschifffahrt wird auf 45 Mio € geschätzt.

Handlungsempfehlungen

Um das Szenario „Klimaneutraler Bodensee“ bis 2040 zu erreichen gelten folgende übergeordneten Kernempfehlungen für die Technik:

- Für die **Freizeitschifffahrt** am Bodensee bietet der batterieelektrische Antrieb die derzeit nachhaltigste und praktikabelste Lösung – emissionsfrei, leise und mit der vorhandenen Strominfrastruktur kompatibel.
- In der **Berufsschifffahrt** kann HVO kurzfristig den Betrieb bestehender Flotten klimafreundlicher gestalten, während batterieelektrische Systeme langfristig wirtschaftlicher und nachhaltiger sind.

Im Detail werden insgesamt acht regulatorisch-politische Handlungsempfehlungen als realistisch angesehen, um die Veränderung hin zum klimaneutralen Bodensee zu initiieren:

1. Ladeinfrastruktur für Sportboote verfügbar machen und ausbauen
2. Einheitliche Wettbewerbsbedingungen für klimaneutrale und fossile Energieträger am Bodensee schaffen
3. Die Notwendigkeit der Rezertifizierung von Booten nach größeren Umbauten gemäß EU-Sportbootrichtlinie untersuchen.
4. Nutzung von HVO als Übergangstechnologie für die Berufsschifffahrt für eine kurzfristige Emissionsreduktion
5. Implementierung von batterieelektrischen Antrieben für die Berufsschifffahrt, um die Kosten für Neubau/Umbau und Betrieb sowie Fahrpreissteigerungen zu minimieren.
6. Nutzung von öffentlichen Förderprogrammen Für Umbau- und Neubaumaßnahmen in der Berufsschifffahrt.
7. Untersuchung der Möglichkeit bidirektionales Laden für die Regelleistungsbereitstellung zu implementieren.
8. Durchführung einer begleitenden Sensibilisierungskampagne, um die Öffentlichkeit und Interessengruppen am See einzubinden.

Die Handlungsempfehlungen wurden für die Sportboote und Berufsschiffe zeitlich synchronisiert, um aufzuzeigen wann welche Maßnahmen greifen müssten für einen beispielhaftes, noch realisierbares Zieldatum 2040. Für die Sportboote wird eine Vereinheitlichung und stufenweiser Ausbau der Ladeinfrastruktur skizziert, die mit regulatorischen Maßnahmen wie der Erhebung eines steigenden Klimabeitrags (initial 5€/kW ab 2028) und einem Zulassungsstopps für klimaschädliche Antriebe ab 2030 flankiert wird. Für die Berufsschiffe wurde ein dreistufiger Plan zur Vorbereitung, Planung und Durchführung von Umbau- und Neubaumaßnahmen in Verbindung mit einem verpflichtenden Umstieg auf HVO für eine schnelle Reduktion der Emissionen entwickelt. In Summe haben die Handlungsempfehlungen das konkrete Ziel, spezifische Leitplanken für einen klaren, aber auch zeitlich-technisch realisierbaren und allgemein akzeptablen Weg hin zum klimaneutralen Bodensee 2040 zu setzen.

1 Einleitung

Die Internationale Bodenseekonferenz hat sich zum Ziel gesetzt, die klimaneutrale Schifffahrt auf dem Bodensee voranzubringen. Dies wurde im Positionspapier vom 28.06.2024 bestätigt [1]. Eine der Herausforderungen stellt dabei die aktuelle Freizeit- und Berufsschiffahrtsflotte auf dem See dar, welche größtenteils mit Verbrennungsmotoren ausgestattet ist und entsprechende Emissionen verursacht. Eine initiale Machbarkeitsstudie von Prof. Dr. Werner Tillmetz mit dem Titel „Klimaneutrale Schifffahrt auf dem Bodensee“ aus dem Jahr 2023 im Auftrag der Bayerischen Staatskanzlei schätzt die Emissionen dieser Flotte dabei auf ca. 52.000t CO₂ im Jahr, welche reduziert werden sollen, wozu auch erste Konzepte vorgeschlagen wurden [2]. Im Rahmen einer Szenariostudie sollen nun detailliertere Konzepte entwickelt werden, wie die Treibhausgasemissionen der (gewerblichen und privaten) Bodenseeschifffahrt reduziert werden können. Konkrete Untersuchungsgegenstände stellen dabei die folgenden Leitfragen dar:

1. Die Machbarkeitsstudie von Herrn Prof. Tillmetz geht davon aus, dass batterieelektrische Antriebe nur für kurze Strecken und langsames Fahren sinnvoll sind. Die Umstellung auf Elektroantriebe soll näher untersucht werden. Hierzu soll auch in den Blick genommen werden, wie im Ausland mit der Thematik umgegangen wird (z.B. in Schweden und Norwegen).
2. Abschätzung der Kosten für die erforderliche Infrastruktur, insbesondere Tankstellen und E-Ladestationen.
3. Abschätzung der Kosten für die Transformation der Schiffe und ihrer Antriebstechnik.
4. Mehrkosten bei der Beschaffung neuer (gewerblicher) Schiffe.
5. Kurzfristig mögliche Maßnahmen im Hinblick auf HVO (Kraftstoffe auf pflanzlicher Basis).
6. Abschätzung der Kosten für E-Methanol, HVO (Kraftstoffe auf pflanzlicher Basis) sowie Stromkosten, auch im Vergleich mit fossilen Kraftstoffen.
7. Darstellung des Kraftstoffverbrauchs der jeweiligen Schiffstypen (Verdränger/Gleiter) mit anwendungsorientierten Fahrprofilen.
8. Ist eine Leistungsbeschränkung im Hinblick auf eine CO₂-Einsparung in der Freizeitschifffahrt zielführend? Zu betrachten sind Leistungsbeschränkungen ab 100, 250 und 500 kW. Zudem ist zu ermitteln, inwiefern eine Leistungsbeschränkung auf einen bestimmtes Verhältnis kW/kg im Sinne einer CO₂-Reduzierung einen Effekt haben kann.

Um die Untersuchungsgegenstände zu adressieren, wird die Studie in vier Arbeitspakete gegliedert. Arbeitspaket 1 beinhaltet eine Ist-Analyse in Bezug auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Zu diesem Zweck werden Fahr- und Nutzungsprofile ermittelt und anhand der Bodenseezulassungsstatistik entsprechende Hochrechnungen erstellt. Darauf aufbauend werden initiale Dekarbonisierungsalternativen abgeleitet. In Arbeitspaket 2 werden die Vor- und Nachteile der identifizierten Dekarbonisierungsalternativen und zugehöriger Infrastrukturen detailliert betrachtet. Dabei werden vor allem Umweltaspekte, Verfügbarkeit von Kraftstoffen und Infrastrukturkomponenten sowie Kosten einbezogen. Arbeitspaket 3 untersucht die schiff- und bootsbaulichen Implikationen alternativer Antriebstechnologien für Um- und Neubaumaßnahmen. Abschließend entwickelt Arbeitspaket 4 einen Realisierungspfad für die klimaneutrale Zukunft des Bodensees.

2 AP1: Ist-Analyse, Fahrprofile und Potenziale

Die Bestimmung der Ist-Situation, insbesondere in Bezug auf Leistungsbedarf, Energieverbrauch und Emissionen der Wasserfahrzeuge am Bodensee stellt die Hauptentscheidungsgrundlage für die Bewertung von alternativen Antrieben dar. Ein Ziel dieses Arbeitspaketes ist daher die Ermittlung der o.g. Parameter. Darauf aufbauend sollen in Frage kommende Alternativen für die Dekarbonisierung auf dem Bodensee bestimmt werden. Die folgende Abbildung 2-1 zeigt eine Übersicht über die gewählte Methodik in diesem Arbeitspaket. Ausgehend von AIS-Bewegungsdaten von Vergleichsrevieren werden Fahrprofile bestimmt. Diese werden dann auf die in den Schiffsregistern des Bodensees erfassten Sportboote übertragen, um Treibstoffverbräuche und CO₂-Emissionen abzuschätzen. Aus dieser Berechnung können die Auswirkungen von Leistungsbeschränkungen abgeleitet werden. In Kombination mit den Emissionsschätzungen für die Berufsschiffahrt aus der Vorgängerstudie von Prof. Tillmetz [2] ergibt sich eine Emissionsschätzung für die gesamte Bodenseeflotte.

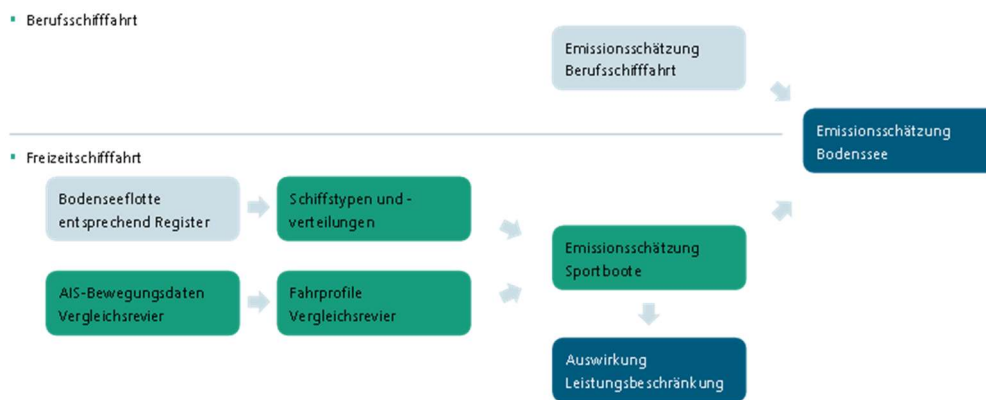


Abbildung 2-1: Methodikübersicht AP1

2.1 Fahrprofile

Da Leistungsbedarf, Energieverbrauch und Emissionen eines Bootes hauptsächlich von Fahrtgeschwindigkeit und Fahrtdauer abhängig sind, ist die Bestimmung realer Fahr- und Nutzungsprofile die Basis zur Ermittlung dieser Parameter die erste Aufgabe dieses Arbeitspaketes. Durch die Registrierungspflicht sind detaillierte Informationen über die Bootsflotte am Bodensee verfügbar. Da auf dem Bodensee jedoch keine Nutzungs- oder Fahrtdaten erhoben werden, ist keine Datengrundlage für eine Messung oder Abschätzung der realen Nutzung verfügbar. Für die vorrangig im Linienverkehr agierende Fahrgastschiffahrt ist eine Annäherung über die Fahrpläne möglich, jedoch nicht im Bereich der Sportschiffahrt. Deren Emissionsanteil ist entsprechend der Analyse der Vorgängerstudie von Prof. Tillmetz aber relevant für die Ergebnisse [2].

Es gibt mehrere Möglichkeiten für die Bestimmung von Fahr- und Nutzungsprofilen, zum Beispiel groß angelegte Befragungen oder Messkampagnen. Für eine Studie auf der Basis von Messkampagnen mit repräsentativen Ergebnissen hätten zwei Kampagnen durchgeführt werden müssen. Zum einen Messfahrten während derer Geschwindigkeit, Leistung und Treibstoffverbrauch für unterschiedliche Boote gemessen werden, um einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Leistung zu ermitteln und diesen auf die restliche Flotte übertragen zu können. Dabei wird davon ausgegangen, dass etwa 50 Boote instrumentiert werden müssten um die drei Bootstypen (Segelboote, Verdränger, Gleiter), zwei Antriebskonfigurationen (Innenbordmotor, Außenbord-

motor), vier Motortypen (2-Takt, 4-Takt, Diesel, Elektro) mit jeweils min. zwei Exemplaren zu erfassen, wobei Größenunterschiede noch unberücksichtigt wären. Zum anderen hätten Geschwindigkeiten im Jahresverlauf für eine noch größere Flotte von Booten aufgezeichnet werden müssen, um die Fahrprofile zu erfassen. Ersteres ist wegen der notwendigen Instrumentierung von Booten an Propellerwelle und Treibstoffsystem sehr aufwendig und kann nur von Experten durchgeführt werden, mit einem Aufwand von geschätzt einem Tag pro Boot. Letzteres hätte wegen der bereits begonnenen Saison im Jahr 2025 nicht mehr abgeschlossen werden können. Beide Kampagnen sind darüber hinaus nur mit kooperationsbereiten Bootseignern möglich.

Befragungen sind wegen der häufig geringen Rücklaufquote ebenfalls sehr aufwendig. Wegen der großen Anzahl an Booten käme am Bodensee nur eine digitale Befragung in Frage. Außerdem sind die Antworten subjektiv. Quantitative Werte sind, wie sie für eine vergleichbare Studie erhoben werden müssten, werden außerdem durch die Probanden geschätzt. Daher sind solche Befragungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Wegen des gegebenen Zeit- und Kostenrahmens wurde im Rahmen dieser Studie daher eine andere Methode gewählt. Die Fahr- und Nutzungsprofile werden aus den AIS-Daten (Automatic Identification System) vergleichbarer Reviere gewonnen.

2.1.1 Exkurs: AIS

Das AIS-System nutzt periodisch ausgesandte Funksignale, die unter anderem eine eindeutige Identifikationsnummer, die Position, Kurs, Momentangeschwindigkeit, grobe Hauptabmessungen eines Schiffes, die Schiffskategorie sowie einen Zeitstempel enthalten, um Schiffen die gegenseitige Identifikation und damit die Teilnahme am Verkehr zu erleichtern [3]. Die Nutzung des Systems ist für die Berufsschifffahrt auf See verpflichtend. Für die Freizeitschifffahrt ist die Teilnahme freiwillig, wegen des Sicherheitsgewinns aber mittlerweile verbreitet. Am Bodensee ist die Nutzung von AIS nicht erlaubt, weshalb in dieser Studie auf Daten vergleichbarer Reviere zurückgegriffen wird.

In Europa dürfen im Freizeitbereich die AIS-Sender durch die Bootseigner selbst programmiert werden. Dies bedeutet, dass Bootseigner sich selbst einer Schiffskategorie zuordnen und die Hauptabmessungen selbst eintragen dürfen, wodurch es zu Fehlern wie falscher Zuordnung zu einer Kategorie kommen kann. Für diese Studie relevant sind die beiden Schiffskategorien Sailing Vessel und Pleasure Craft, die jeweils mit Segelbooten bzw. Motorbooten assoziiert werden. Außerdem werden die Hauptabmessungen im AIS-System aufgerundet, wodurch leichte Abweichungen entstehen. Fehler bei den Hauptabmessungen wurden gemäß Kapitel 2.1.3.2 korrigiert. Die Zuordnung zu Kategorien konnte nicht korrigiert werden.

2.1.2 Auswahl der Datenquellen

Als mit dem Bodensee vergleichbare Reviere wurden Seen ausgesucht, die folgende Kriterien erfüllen:

1. Binnenrevier
2. Vorhandensein von AIS-Daten
3. Nutzung hauptsächlich durch die Freizeitschifffahrt

Anhand dieser Kriterien wurden das Ijsselmeer und die großen schwedischen Seen Vänern und Vättern als mögliche Datenquellen identifiziert. In Tabelle 2-1 sind die Flächen und größte Ausdehnungen der einzelnen Reviere aufgeführt. Die Tabelle zeigt, dass das Ijsselmeer ca. die doppelte, der Vättern die dreifache und der Vänern etwa die zehnfache Fläche des Bodensees haben. Die größte Ausdehnung des Ijsselmeeres ist ähnlich der des Bodensees, während Vänern und Vättern etwa die doppelte Ausdehnung haben. Basierend auf der Fläche und der maximalen Ausdehnung erscheint das

„Ijsselmeer am ehesten mit dem Bodensee vergleichbar, da auf ihm ähnliche Tagesdistanzen zwischen einzelnen Häfen zurückgelegt werden können. Ähnlich zum Bodensee gilt eine Geschwindigkeitsbegrenzung im Uferbereich von 20km/h, die zusätzlich auch für einzelne Korridore zwischen den Häfen beachtet werden muss. Sonst ist die Geschwindigkeit unbegrenzt [4]. Dies erscheint nicht als gravierender Nachteil, da Geschwindigkeiten über der Geschwindigkeitsbegrenzung des Bodensees als maximal erlaubte Geschwindigkeit gewertet werden können, d.h. alle Geschwindigkeiten über 40km/h werden als 40km/h angenommen. Wegen der geringen Wassertiefe eignet sich das Ijsselmeer kaum für die Großschifffahrt und ist daher durch Freizeitnutzung geprägt. Durch die große Anzahl an Booten und empfangenen Signalen ist das Ijsselmeer die Hauptdatenquelle für diese Studie.

Tabelle 2-1: Vergleich der Flächen, größten Ausdehnungen, Bootsanzahl und Anzahl an AIS-Signalen von Bodensee, Ijsselmeer, Vänern und Vättern

Revier	Fläche [km ²]	Größte Ausdehnung [km]	Registrierte Boote	AIS-Signale
Bodensee	536	63	36888	-
Ijsselmeer	1100	50	11987	15,6M
Vänern	5519	150	810	0,44M
Vättern	1886	135	601	0,25M

2.1.3 Datenanalyse

2.1.3.1 Geofencing

Im ersten Schritt wurden aus dem weltweiten Datensatz der AIS-Daten diejenigen Signale herausgefiltert, die innerhalb der Grenzen des jeweiligen Reviers gesendet wurden. Die verwendeten Grenzen von Ijsselmeer, Vänern und Vättern sind in Abbildung 2-2 bis Abbildung 2-4 dargestellt.



Abbildung 2-2: Grenzen des Ijsselmeers.

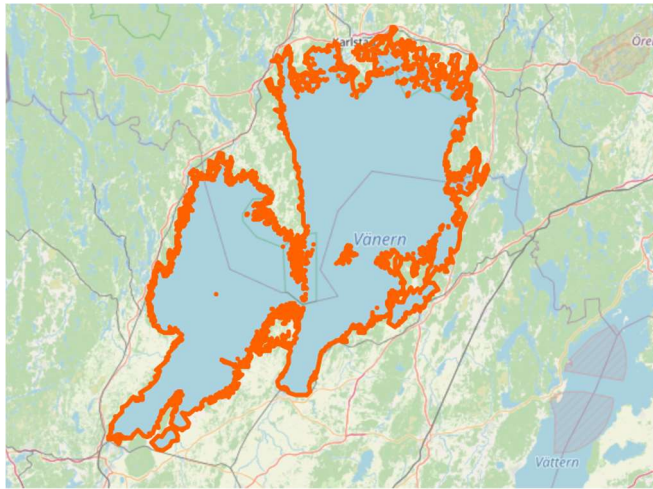


Abbildung 2-3: Grenzen des Vänern.

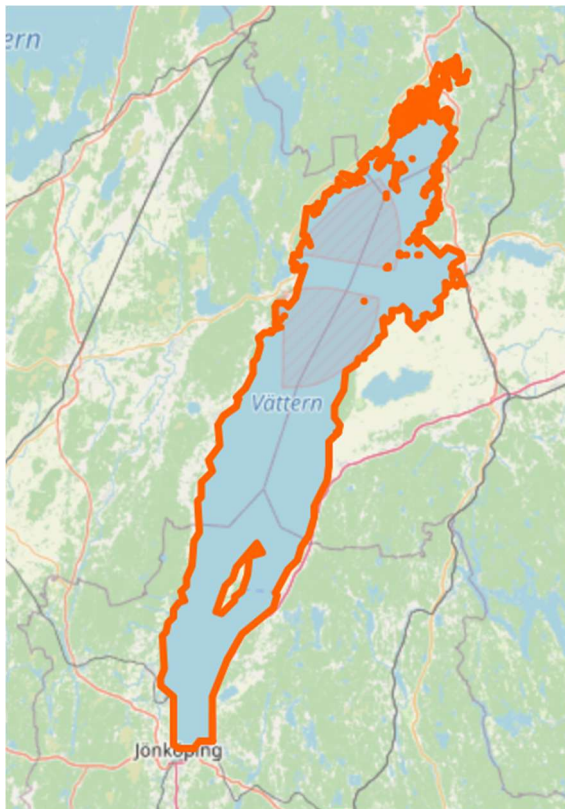


Abbildung 2-4: Grenzen des Vättern.

2.1.3.2 Datenprüfung

Der Datensatz umfasst alle vom Unternehmen ORBCOMM [5] erfassten AIS-Nachrichten (dynamisch, statisch und reisebezogen), die mit Satelliten und terrestrischen Basisstationen weltweit empfangen wurden. Da Datensätze teilweise falsche Werte wegen Tippfehlern, Datenberechnungsfehlern oder fehlerhafte Datenspeichergeräte erhalten, wurde zu Beginn der vorhandene Datensatz einer Datenbereinigung unterzogen. Wir verwendeten einen Ansatz der Kreuzvalidierung zwischen mehreren

Quellen, um zweifelhafte Werte zu entfernen. Schiffslänge und Schiffsbreite für jede im AIS-Datensatz innerhalb der oben aufgeführten Regionen erkannte MMSI wurde mit den Daten auf MarineTraffic, einer öffentlichen Plattform, zur Validierung abgeglichen. Diese Plattform greift ebenfalls auf die Daten der AIS-Signale zurück, der Datensatz für dieselbe MMSI sollte also theoretisch identisch sein. Eine Abweichung deutet daher auf einen Fehler in einem der Datensätze hin. Bei Unterschieden über ein Meter in der Schiffslänge oder Schiffsbreite wurden die Signale der entsprechenden MMSI aus dem Datensatz entfernt und nicht für die weiteren Auswertungen berücksichtigt. Dieser Schritt wurde vollzogen, da während der ersten Explorationen innerhalb des Datensatzes in einigen Fällen unplausible Werte für die angegebene Länge und Breite gefunden wurden.

2.1.3.3 Analyse & Vergleich der Flottenstrukturen

Ziel dieser Analyse ist ein Vergleich der Bootsgrößen auf dem Bodensee mit den AIS-Datenquellen, um herauszufinden, inwieweit die jeweiligen Flotten vergleichbar sind. Abbildung 2-5 zeigt einen Vergleich der Längenverteilungen zwischen den durch die AIS-Signale und den in den Schiffsregistern am Bodensee erfassten Bootsflotten. Die Motorboote am Bodensee haben eine Länge zwischen 2,5m und 15m, wobei der Großteil der Boote (knapp 60%) auf den Bereich zwischen 4m und 6m entfällt. Die registrierten Segelboote mit Motor sind im Durchschnitt etwas größer, 70% der Segelboote liegen im Bereich zwischen 6m und 9m. Boote, die AIS-Signale aussenden, sind mehrheitlich größer. Ca. 60% der Segelboote, die AIS-Signale senden, sind zwischen 10m und 12m lang. Motorboote, die durch das AIS erfasst werden, sind noch etwas größer, etwa 70% der Boote sind zwischen 10m und 15m lang. In den AIS-Daten wurden also insgesamt größere Boote erfasst, die aber noch immer im Bereich von Sportbooten liegen und sich zumindest teilweise mit den Flotten am Bodensee überschneiden.

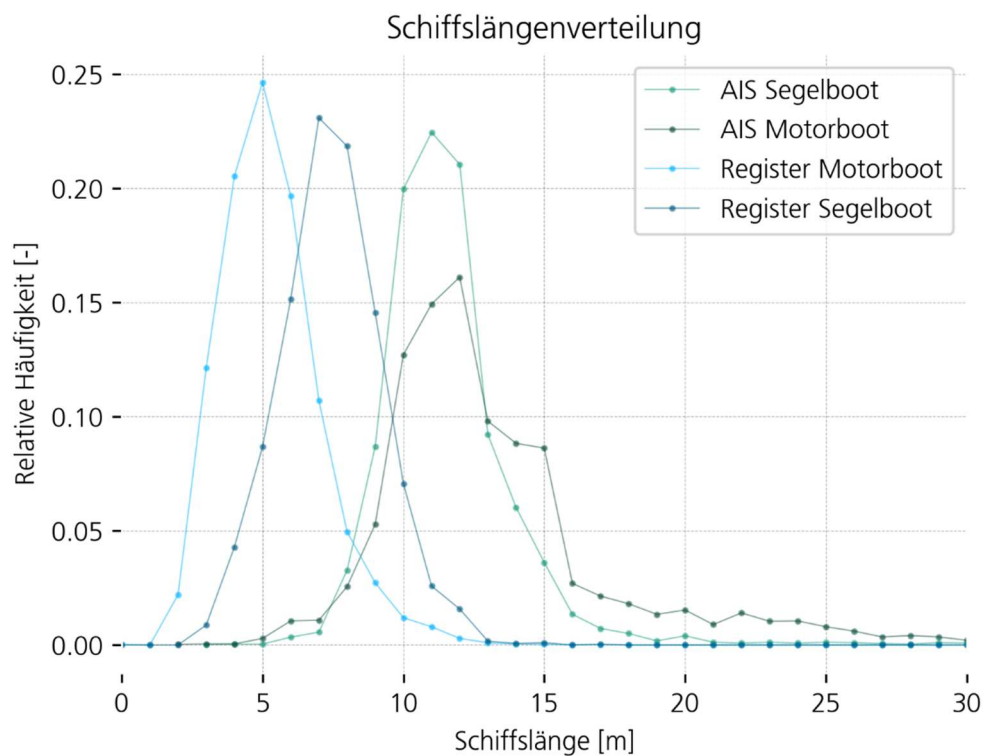


Abbildung 2-5: Vergleich der Schiffslängenverteilungen aus AIS-Daten und Schiffsregistern.

Abbildung 2-6 zeigt einen Vergleich der relativen Häufigkeiten von Längen-Breiten-Verhältnissen in den unterschiedlichen Bootsflotten. Bei den AIS-Daten liegt dieses Verhältnis für die überwiegende Mehrheit beider Bootstypen zwischen zwei und vier, wobei es ein deutliches Maximum bei drei gibt, wo jeweils ca. 25% der Flotte dieses Verhältnis aufweisen. Bei den Daten aus den Schiffsregistern ergibt sich für die Segelboote ein ähnliches Bild, auch für diese Flotte liegen die Werte hauptsächlich zwischen zwei und vier mit einem deutlichen Maximum bei einem Längen-Breiten-Verhältnis von drei und damit eine gute Übereinstimmung mit den AIS-Daten. Für die Motorboote in den Schiffsregistern liegt das Verhältnis ebenfalls im angegebenen Bereich, allerdings liegt das Maximum bei ca. 2,5. Die Motorboote sind also etwas breiter im Verhältnis zur Länge. Dies kann auf die im Durchschnitt etwas geringere Länge zurückgeführt werden (siehe Abbildung 2-5), da kleinere Boote zur Sicherstellung der Kenterstabilität breiter sein müssen. Für die Motorboote ist die Übereinstimmung schlechter als für die Segelboote, aber es gibt noch immer eine deutliche Überschneidung zwischen den Datensätzen.

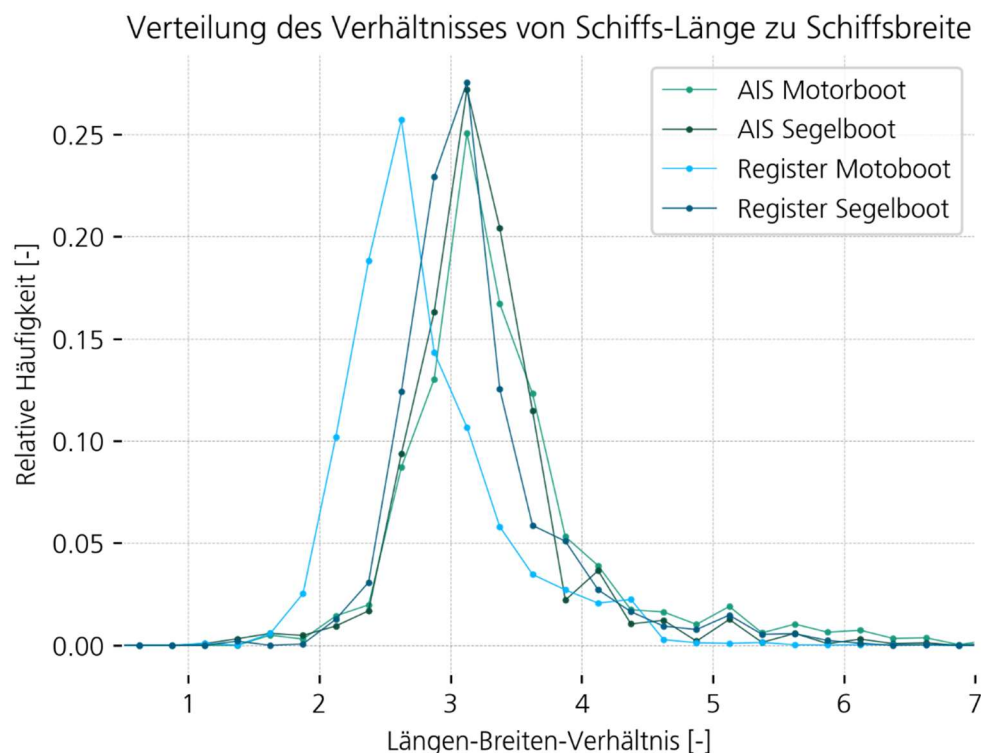


Abbildung 2-6: Bootregister und AIS-Daten: Vergleich des Längen-Breiten-Verhältnisses zwischen den Flotten aus AIS-Daten und Schiffsregistern

Abbildung 2-7 zeigt einen Vergleich der Anteile von motorisierten Segelbooten und Motorbooten an den Flotten am Bodensee und im AIS-Datensatz. Am Bodensee sind 70% der registrierten Motorfahrzeuge reine Motorboote und 30% Segelboote. Im AIS-Datensatz gibt es ca. 44% Segelboote und 56% Pleasure Craft. Der Anteil der Segelboote im AIS-Datensatz ist also ca. 15 Prozentpunkte höher. Er kann in der Realität auch noch höher sein, da in der Kategorie Pleasure Craft des AIS weitere Segelboote inkludiert sein können, die sich fälschlicherweise mit dieser Kategorie identifizieren (siehe Kapitel 2.1.1).

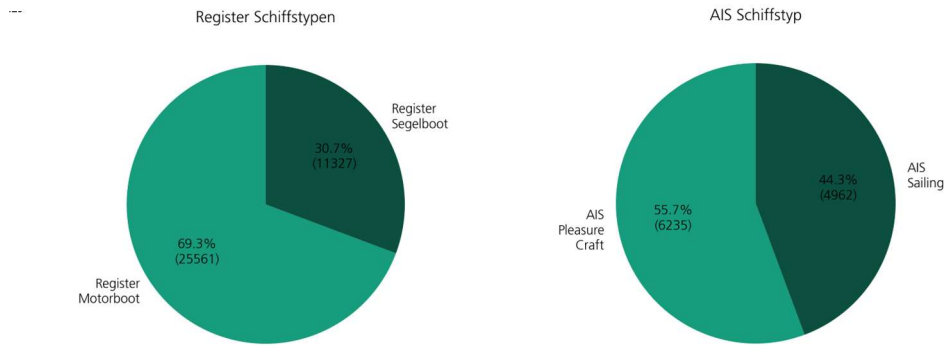


Abbildung 2-7: Anteil von Motorbooten und Segelbooten in den Schiffsregistern des Bodensees (links) sowie Anteil von Pleasure Craft and Sailing Vessels im AIS-Datensatz (rechts).

Für die Leistungsvorhersage spielt es eine Rolle, ob ein Boot einen Verdrängerrumpf oder einen auf das Gleiten ausgelegten Rumpf hat (siehe Kapitel 2.2). Der Kanton St. Gallen nimmt bei der Registrierung von Booten eine Expertenschätzung vor, um Motorboote als Verdrängerrumpf oder Gleitrumpf einzuordnen. In Abbildung 2-8 sind die Anteile von Verdrängerrumpfformen und Gleitrümpfen im Schiffsregister St. Gallen dargestellt. Die Mit über 94% stellen Gleitrümpfe die überwiegende Mehrheit an den gut 1400 registrierten Motorbooten dar, die knapp 4% der Gesamtflotte am See repräsentieren. Es wird angenommen, dass diese Verteilung repräsentativ für den gesamten Bodensee ist.

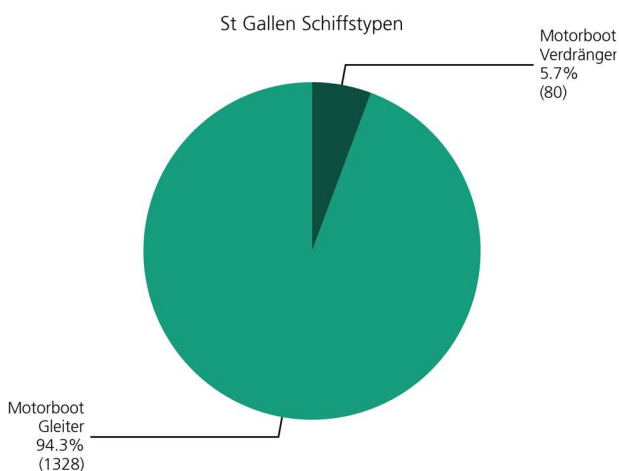


Abbildung 2-8: Anteil von Verdränger- und Gleitrümpfen im Schiffsregister St. Gallen.

2.1.3.4 Extraktion der Fahrprofile

Für die Zwecke dieser Studie wurden Fahrprofile ermittelt. Als Fahrprofile werden in dieser Studie Kombinationen aus Geschwindigkeits- und Nutzungsprofilen bezeichnet. Geschwindigkeitsprofile sind dabei Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeiten bzw. Froude'schen Zahlen. Nutzungsprofile dagegen beschreiben wie häufig und wie lange Boote mit einem gegebenen Geschwindigkeitsprofil genutzt werden und welche Distanzen dabei zurückgelegt werden.

Für die Extraktion der Geschwindigkeitsprofile wurden anhand der mit den AIS-Signalen gesendeten Daten die Froude'schen Zahlen gemäß Gleichung (1) berechnet,

in der v die Geschwindigkeit, g die Gravitationskonstante und L die Länge darstellen. Die Froude'sche Zahl setzt Trägheitskräfte und Schwerekräfte einer Strömung ins Verhältnis. In dieser Studie wird sie hauptsächlich verwendet, um dieses Verhältnis bei der Übertragung von Geschwindigkeiten zwischen Booten unterschiedlicher Größe konstant zu halten, da geometrisch ähnliche Rümpfe bei konstanter Froude'scher Zahl ein ähnliches Wellenbild erzeugen. Die als Wellen abgestrahlte Energie hat einen erheblichen Einfluss auf den Widerstand. Eine direkte Übertragung der Geschwindigkeit würde bedeuten, dass kleinere Boote im Verhältnis schneller fahren, dabei größere Wellen erzeugen, folglich mehr Widerstand erfahren und mehr Energie verbrauchen.

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{g * L}} \quad (1)$$

Eine Froude'sche Zahl von 0,39 entspricht in etwa dem Ende der reinen Verdrängerfahrt [6] und wird auch als Rumpfgeschwindigkeit bezeichnet. Beim Erreichen dieser Geschwindigkeit steigt der Widerstand stark an, weshalb es auf die Verdrängerfahrt ausgelegten Booten im Allgemeinen nicht möglich ist diese Geschwindigkeit dauerhaft wesentlich zu überschreiten. Das trifft auf viele Segelyachten und einen Teil der Motorboote zu. Eine Froude'sche Zahl von ca. 0,89 bis 1,0 markiert den Beginn der reinen Gleitfahrt, bei der die Masse eines Bootes hauptsächlich durch dynamischen Auftrieb getragen wird. Der Bereich zwischen Verdrängerfahrt und Gleitfahrt wird als Halbgleiten bezeichnet [7], bei dem für die Hydrodynamik sowohl Verdrängungseffekte als auch dynamischer Auftrieb eine Rolle spielen.

Abbildung 2-9 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Froude'schen Zahl, wie sie aus den AIS-Daten für die beiden Kategorien Sailing Vessel und Pleasure Craft bestimmt wurde. Die Verteilung ist für beide Bootsarten ähnlich. Geschwindigkeiten nahe 0 wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da diese Signale zwar sehr häufig auftreten, aber hauptsächlich durch vertäute und ankernde Boote ausgesendet werden, die sich nicht in Fahrt befinden. Ausgehend vom Wert null nehmen die Häufigkeiten mit steigender Froude-Zahl zu, bis zu einem Wert von ca. sechs Prozent, die bei einer Froude-Zahl von 0,25 für Sailing Vessels bzw. 0,27 für Pleasure Craft erreicht wird. Danach fallen die Häufigkeiten stark ab, bis sie sich ab einer Froude'schen Zahl von ca. 0,35 beginnen asymptotisch an den Wert null anzunähern, der bei ca. 0,45 erreicht wird.

Für Segelyachten, die ihre Rumpfgeschwindigkeit in den meisten Fällen nicht überschreiten können, ist es plausibel, dass sich die Froude'schen Zahlen zwischen 0 und maximal 0,45 bewegen. Die wenigen Punkte über der Rumpfgeschwindigkeit können durch kleine Messfehler und kurze Geschwindigkeitsspitzen erklärt werden. Auch die relativ breite Verteilung mit einem klaren Maximum aber ohne extreme Spitze erscheint realistisch, da die Geschwindigkeit beim Segeln nicht frei gewählt wird, sondern von Windstärke und -Richtung abhängig ist und sich ständig ändert, sodass viele unterschiedliche Geschwindigkeiten erwartet werden können.

Bezogen auf Motorboote ist es auffällig, dass auch hier die beobachteten Froudezahlen den Bereich der Verdrängerfahrt kaum überschreiten. Es gibt praktisch keine Daten in den Geschwindigkeitsbereichen des Halbgleitens und Gleitens, obwohl viele Motorboote diese erreichen können. Die Ähnlichkeit der Fahrprofile zwischen Sailing Vessels und Pleasure Craft könnte ein Hinweis darauf sein, dass eventuell einige Segelyachten der falschen Kategorie zugeordnet sind, da Bootseigner die AIS-Sender selbst programmieren können (siehe 2.1.1). Allerdings würde das nicht erklären, warum nicht trotzdem auch höhere Geschwindigkeiten in den Daten zu sehen sind, wenn nicht alle Boote in der Kategorie Pleasure Craft ausschließlich Segelboote sind. Mögliche weitere Ursachen können sein, dass unter den in den AIS-Daten erfassten, relativ großen Motorbooten (s.o.) viele auf die Verdrängerfahrt ausgelegt sind und daher tatsächlich mit diesem Geschwindigkeitsprofil fahren. Bei Froudezahlen um 0,25 kann bei Schiffen häufig eine

gute Energieeffizienz erreicht werden, sodass diese für Motorboote eine plausible Wahl darstellen. Weiterhin ist auf dem IJsselmeer selbst die landesweite Geschwindigkeitsbegrenzung in den Niederlanden von 20km/h weitestgehend aufgehoben, aber auf den umliegenden Flüssen und Kanälen gelten Geschwindigkeitsbegrenzungen [4]. Wenn Boote also auch außerhalb des IJsselmeers genutzt werden, ergibt die Nutzung von gleitfähigen Booten vermutlich weniger Sinn. Bei einem hohen Anteil von gleitfähigen Motorbooten in der Flotte, wie wir ihn am Bodensee vorfinden, sind die erzielten Ergebnisse daher nur begrenzt übertragbar. Allerdings liegen zu den realen Fahrprofilen von Gleitern am Bodensee oder aus anderen Revieren keine belastbar verwertbaren Daten vor. Diese könnten nur mit zeitlich und kostentechnisch hohem Aufwand ermittelt werden, der voraussichtlich nicht in einer wirtschaftlichen Relation zum erwarteten Erkenntnisgewinn steht. Aus diesem Grund wird hier auch das ermittelte Fahrprofil als beste Schätzung verwendet, welche auf Realdaten basiert und im weiteren Verlauf zusätzlich auch ein Szenario betrachtet, bei dem die Boote mit Höchstgeschwindigkeit fahren, um eine Obergrenze für die Treibstoffverbräuche zu definieren.

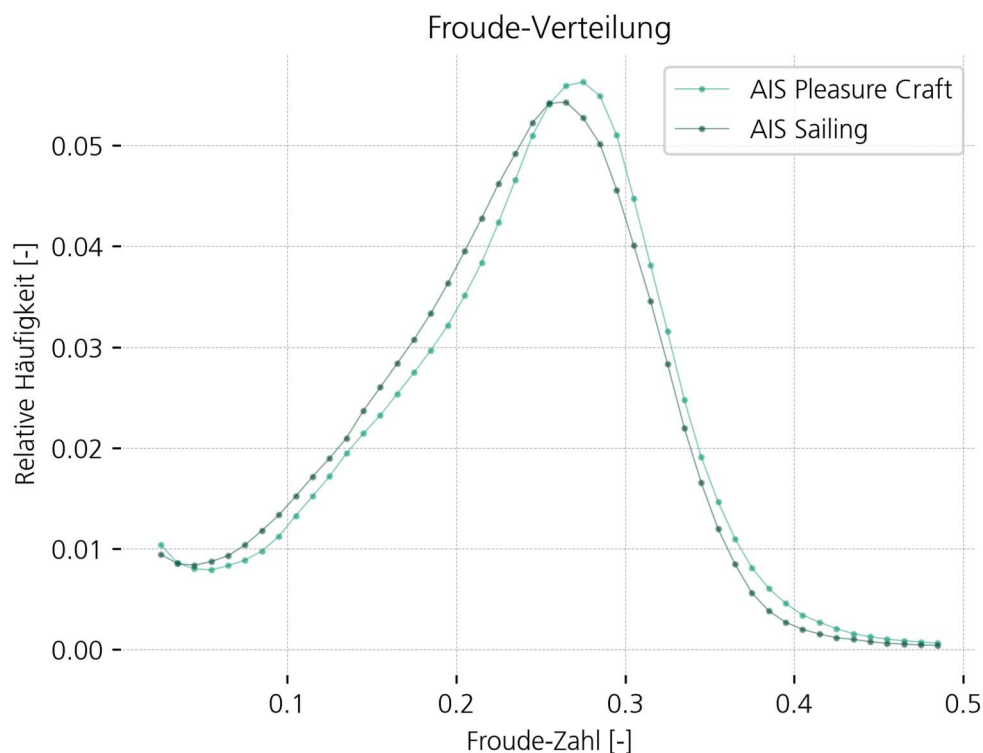


Abbildung 2-9: Geschwindigkeitsprofile als Häufigkeitsverteilung der Froude-zahlen für die AIS-Kategorien Sailing Vessel und Pleasure Craft in den betrachteten Revieren.

Zum besseren Verständnis sind in der folgenden Abbildung 2-10 exemplarisch die aus der Verteilung der Froude'schen Zahl (Abbildung 2-9) resultierenden Geschwindigkeitsprofile für vier Motorboote mit einer Länge zwischen 5,0m und 12,9m dargestellt. Diese Längen entsprechen etwa der am häufigsten am Bodensee registrierten Bootgröße (siehe Abbildung 2-5), der durchschnittlichen Bootgröße sowie der 90. und 99. Größenpercentile.

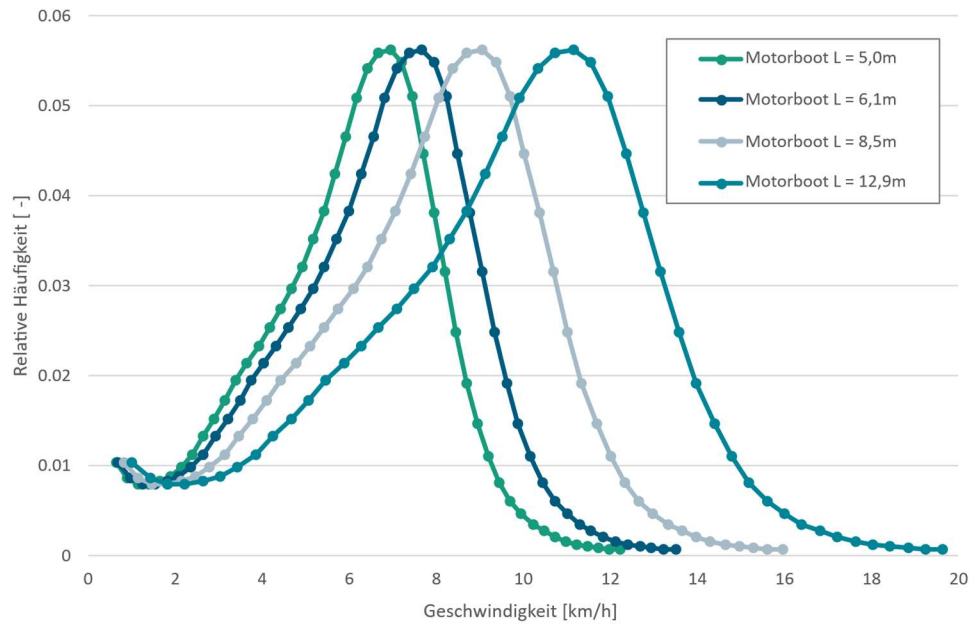


Abbildung 2-10: Exemplarische Geschwindigkeitsprofile für die am häufigsten registrierte Bootsgröße, die durchschnittliche Bootsgröße und die 90. Und 99. Größenpercentile bei Motorbooten

Abbildung 2-11 zeigt entsprechende Geschwindigkeitsverteilung für die entsprechend bei den Segelbooten identifizierten Größenklassen.

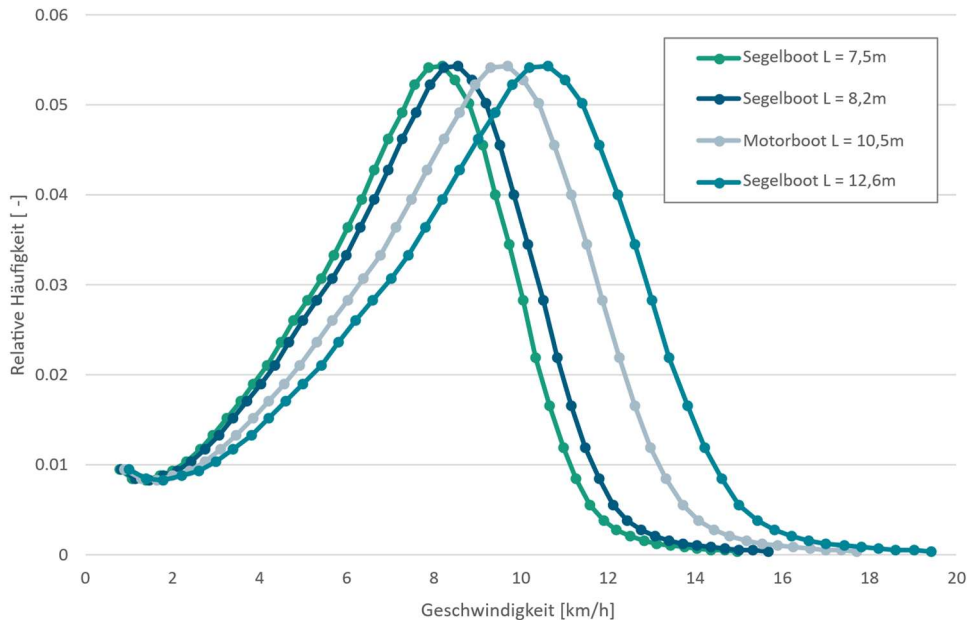


Abbildung 2-11: Exemplarische Geschwindigkeitsprofile für die am häufigsten registrierte Bootsgröße, die durchschnittliche Bootsgröße und die 90. Und 99. Größenpercentile bei Segelbooten

Im Anschluss an die Geschwindigkeitsprofile wurden die Nutzungsprofile extrahiert. Der Umfang der täglichen Nutzung bestimmt den täglichen Energiebedarf. Unter der Annahme, dass Boote fast ausschließlich tagsüber genutzt werden und nachts im Ha-

ffen liegen, wo Energievorräte ggf. aufgefüllt werden können, ist der tägliche Energiebedarf maßgeblich für die Dimensionierung der Energiespeicher an Bord. In einem ersten Schritt wurde daher diese Annahme anhand der zurückgelegten Distanz im Tagesverlauf überprüft.

Die folgende Grafik (Abbildung 2-12) zeigt die kumulierten, jeweils innerhalb einer Stunde von allen Booten im Revier insgesamt zurückgelegten Distanzen im Verlauf des Tages. Zwischen Mitternacht und fünf Uhr sind die Werte nahe null. Danach steigen die zurückgelegten Distanzen stark an bis am Vormittag um ca. zehn Uhr das Maximum erreicht ist. Von dort sinken die zurückgelegten Distanzen wieder, bis um ca. 20 Uhr wieder das niedrige Niveau der Nacht erreicht ist. Insgesamt ist deutlich zu erkennen, dass die Boote hauptsächlich tagsüber zwischen ca. Fünf Uhr am Morgen und 19 Uhr am Abend bewegt werden und entsprechend Wege zurücklegen. Die Annahme, dass Freizeitboote überwiegend tagsüber genutzt werden, ist daher zutreffend.

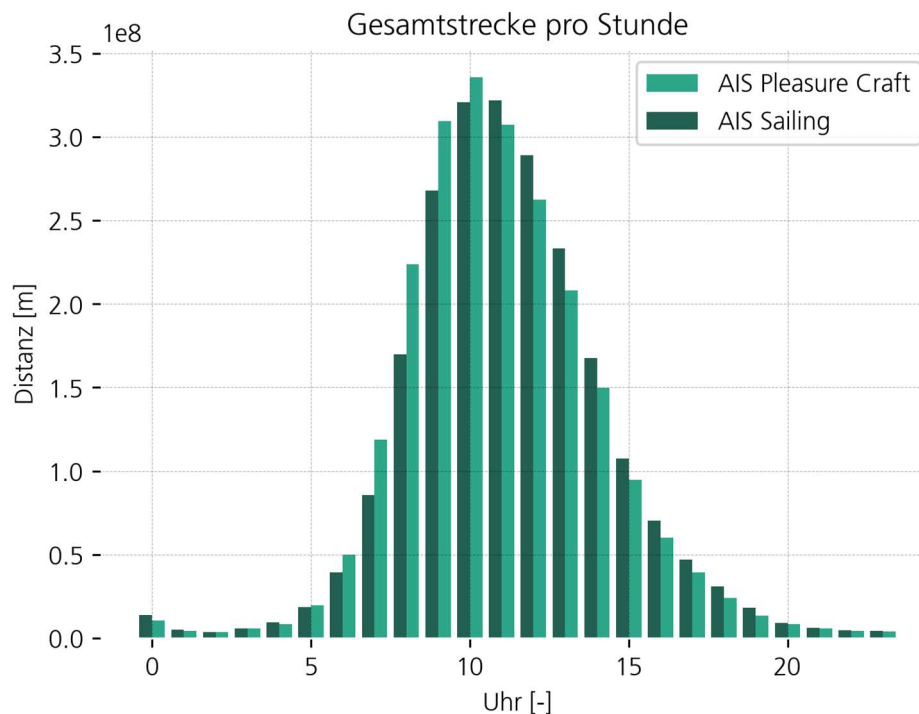


Abbildung 2-12: Zurückgelegte Gesamtstrecke aller Boote pro Stunde in AIS-Daten

Abbildung 2-14 zeigt die kumulierte Distanz aller Boote pro Tag im Jahresverlauf. Die Grafik zeigt, dass zu Beginn des Jahres kaum Distanzen zurückgelegt werden. Dieser Zustand hält ungefähr bis Anfang April an. Ab diesem Zeitpunkt nehmen die zurückgelegten Distanzen insgesamt zu, wobei der Kurvenverlauf periodisch stark ansteigt und abfällt. Ende Mai/Anfang Juni ist ein erster Aktivitätshöhepunkt erreicht. In der Folge nehmen die zurückgelegten Distanzen leicht ab, bleiben aber bis ca. Mitte August auf einem hohen Niveau. Eine zweite Phase sehr hoher Aktivität erstreckt sich von Mitte August bis Anfang September. Danach nehmen die zurückgelegten Distanzen wieder langsam ab, bis ab Anfang November kaum noch Fahrten registriert werden. Insgesamt ist der Verlauf stark saisonal geprägt. Ausgehend von einer Winterpause steigt die Aktivität im Frühjahr an und erreicht zu Beginn des Sommers einen ersten Höhepunkt. Die Hohe Aktivität während des Sommers endet mit einem zweiten Höhepunkt, bevor sie während des Herbstes wieder abnimmt und während des Winters pausiert. Die periodischen Spitzen werden durch die vermehrte Nutzung der Boote an den Wochenenden verursacht.

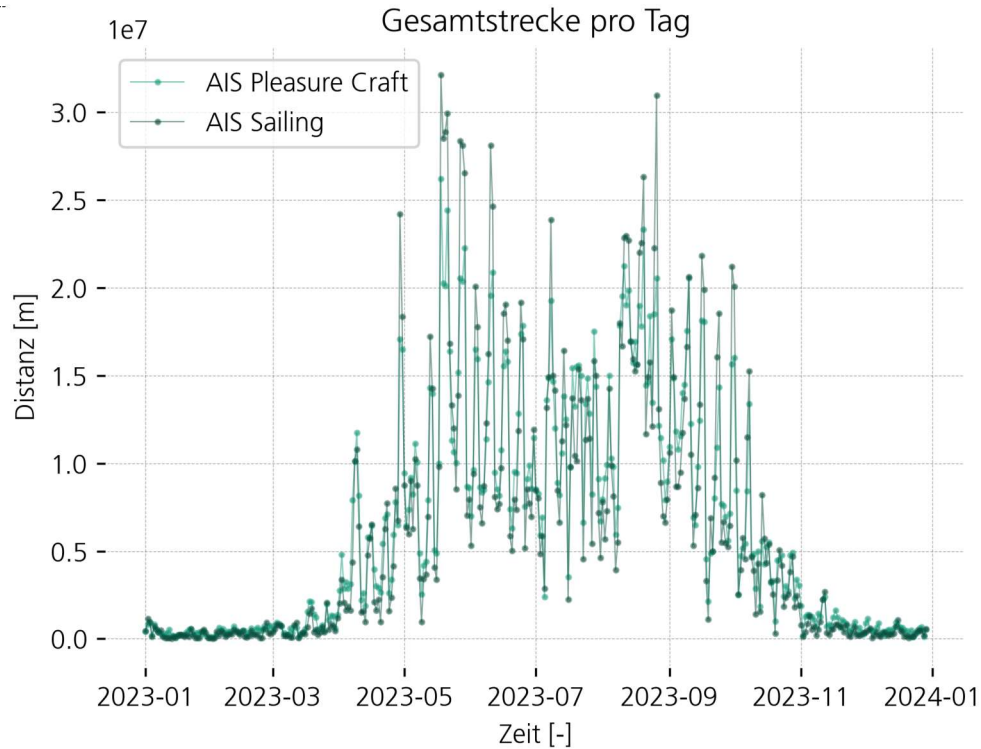


Abbildung 2-13: AIS-Daten Gesamtstrecke pro Tag im Jahresverlauf 2023.

Abbildung 2-14 zeigt eine Darstellung der kumulierten Fahrstrecke aller Boote pro Woche im Jahresverlauf. Dies entspricht einer um die lokalen Spitzen und Senken in Abbildung 2-13 bereinigten Darstellung.

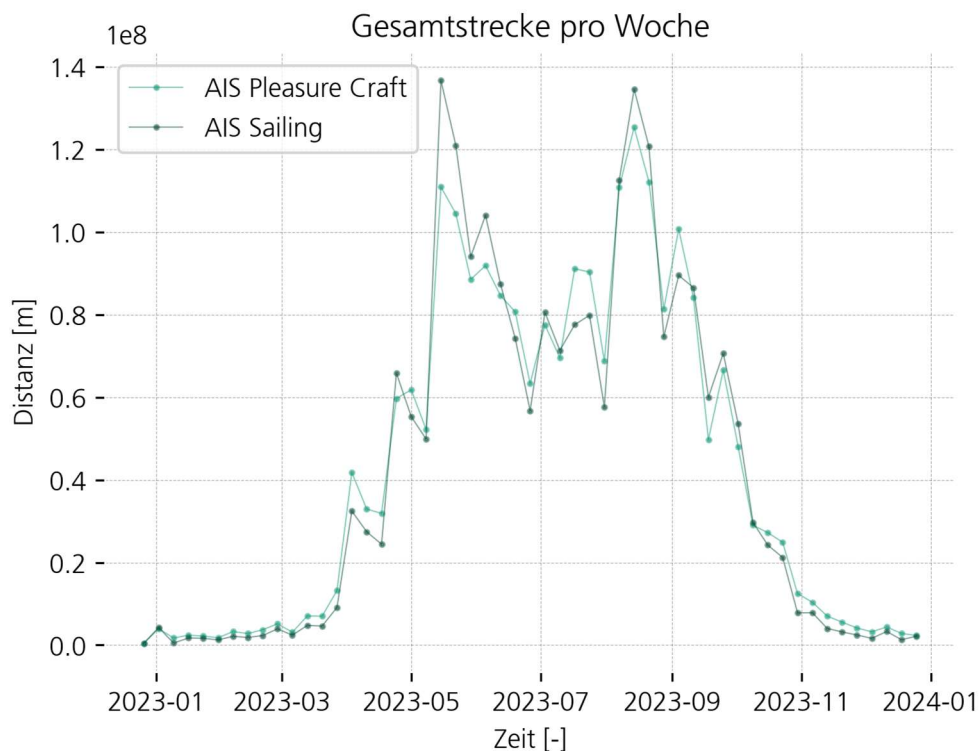


Abbildung 2-14: AIS-Daten Gesamtstrecke pro Woche im Jahresverlauf 2023.

Abbildung 2-15 zeigt die Häufigkeit von einzelnen Booten im Tagesverlauf (24h) zurückgelegter Distanzen für die AIS-Kategorien Pleasure Craft und Sailing Vessel im Laufe eines Jahres. Die zurückgelegten Distanzen sind für beide Kategorien ähnlich. Distanzen unter 1000m werden als vernachlässigbar betrachtet. Distanzen von 1000m wurden in ca. 200 bzw. 350 Fällen beobachtet. Für Distanzen bis etwa 6000m steigt die Häufigkeit für beide Kategorien leicht an. Ab einer Tagesdistanz von 6000m mit um 500 Beobachtungen nimmt die Häufigkeit stärker zu und erreicht bei einer Distanz von etwa 12500m einen Wert von 2400. Für Distanzen zwischen 12500m und ca. 25000m liegt die Beobachtungshäufigkeit im Bereich zwischen 1900 bis 2400. Größere Distanzen werden zunehmend seltener beobachtet. Tagesdistanzen von 100km werden jeweils nur ca. 250 mal pro Jahr erreicht. Distanzen größer als 125km werden praktisch nie zurückgelegt. Für die Untersuchung der Eignung von Elektroantrieben wurde jeweils die dem 95. Percentil entsprechende Distanz aus diesen Tagesdistanzen (siehe Abbildung 2-15) bestimmt. Das bedeutet 95% der Boote legen pro Tag diese oder eine geringere Distanz zurück. Diese Distanz beträgt für Pleasure Craft etwa 58.5km und für Sailing Vessels 60.4km.

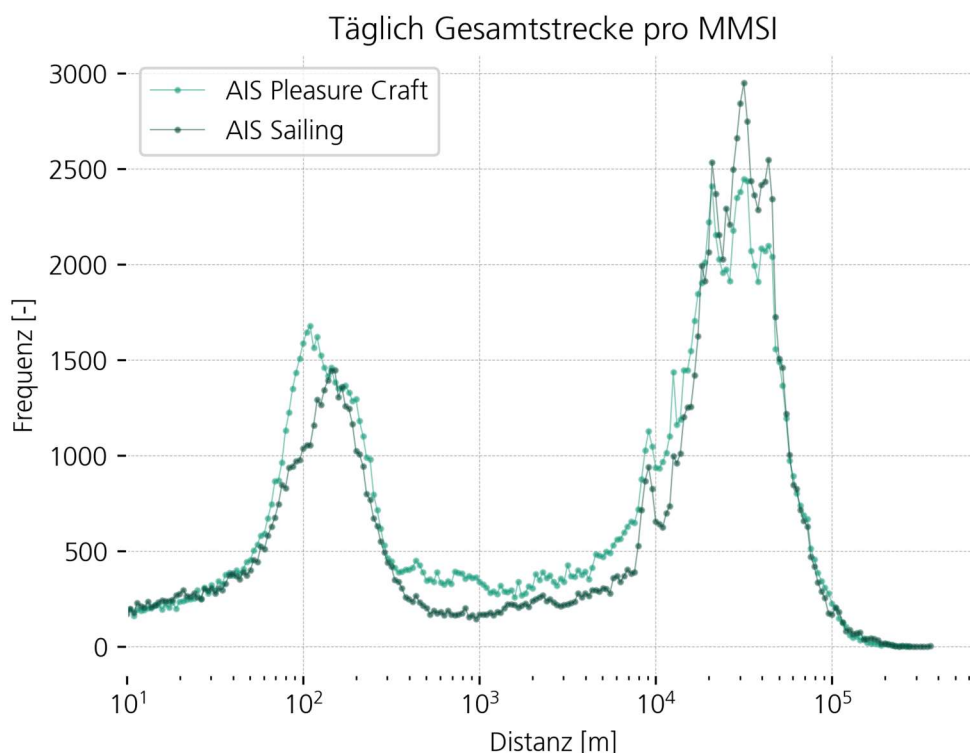


Abbildung 2-15: Häufigkeitsverteilung der Gesamtdistanzen pro Boot pro Tag in AIS-Daten.

Abbildung 2-16 zeigt die von einzelnen Booten zurückgelegte Gesamtdistanz im Laufe eines Jahres für die AIS-Kategorien Pleasure Craft und Sailing Vessel. Distanzen zwischen 1m und 1000m wurden sehr selten beobachtet. Distanzen zwischen 1km und 10km wurden zunehmend häufiger beobachtet, bleiben aber weiter auf geringem Niveau unter 50 Fälle pro Jahr. Ab einer Jahresdistanz von 10km nehmen die Beobachtungen stark zu und erreichen einen Wert von ca. 450 Booten, die pro Jahr eine Distanz von 100km zurücklegen. Strecken zwischen 100km und 500km sind ähnlich häufig. Größere Distanzen werden von einzelnen Booten zunehmend seltener zurückgelegt. Nur jeweils ca. 200 Boote legen mehr als 1000km pro Jahr zurück, bei weniger als 50 sind es 1250km. Mehr als 3000km innerhalb eines Jahres legt kein Boot zurück.

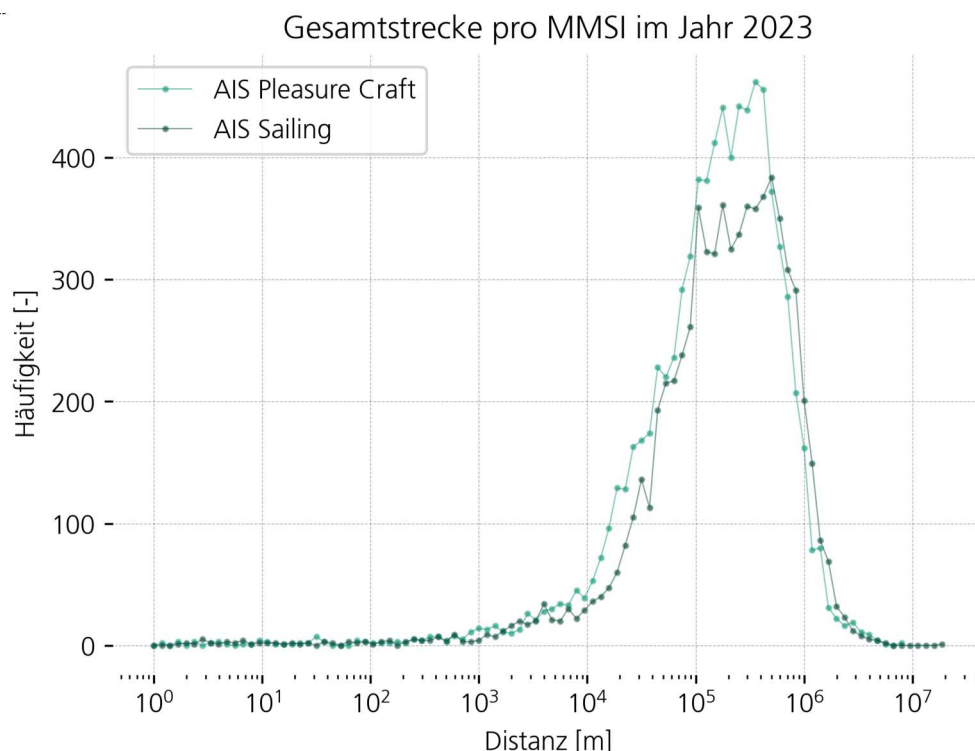


Abbildung 2-16: Häufigkeitsverteilung der Gesamtdistanzen pro Boot pro Jahr in AIS-Daten.

2.1.3.5 Vergleich mit der Vorgängerstudie

Im Vergleich mit der Vorgängerstudie von Prof. Tillmetz wurden in dieser Studie andere Annahmen zur Ermittlung von Treibstoffverbräuchen und Emissionen zugrunde gelegt. Die folgende Tabelle 2-2 stellt die angenommenen Fahrtzeiten gegenüber. Die in dieser Studie angenommenen Fahrtzeiten, wurden auf Basis der Jahresdistanz und des Geschwindigkeitsprofils gemäß Abbildung 2-9 ermittelt und sind deutlich höher. In der untenstehenden Tabelle 2-2 sind Durchschnittswerte angegeben, da die jährliche Fahrtzeit für jedes Boot individuell ist. Die jeweilige Jahresdistanz wurde jedem Boot per Zufallsprinzip entsprechend der beobachteten Häufigkeiten (siehe Abbildung 2-15) zugewiesen. Die angenommenen Antriebsleistungen können nicht direkt verglichen werden, da sie in dieser Studie für jedes Boot anhand des Geschwindigkeitsprofils individuell berechnet wurden. An dieser Stelle soll daher nur erwähnt werden, dass eine Fahrt unter Volllast für viele Boote eine Überschreitung der Geschwindigkeitsbegrenzung bedeutet (siehe auch Abbildung 2-21). Durch die in dieser Studie verwendete Methodik wird der Volllastbereich daher nur selten erreicht werden, was effektiv zu einer niedrigeren Schätzung der abgerufenen Leistung führt.

Tabelle 2-2: Vergleich der Fahrtzeiten mit der Vorgängerstudie

Bootskategorie Fahrtzeit Studie Tillmetz [h] [2] ø Fahrtzeit Diese Studie [h]

Segelboote	17,04	49,23
Motorboote	29,77	46,63

2.2 Ist-Zustand

Zur Bestimmung des Ist-Zustandes wurden Treibstoffverbrauch und Emissionen wie folgt für zwei Szenarien geschätzt. Im ersten Szenario wurden die ermittelten Fahrprofile bestehend aus Geschwindigkeitsprofil und Nutzungsprofil auf die Bodenseeflotte übertragen. Im zweiten Szenario wurde das Geschwindigkeitsprofil durch die jeweilige individuelle Höchstgeschwindigkeit jedes Bootes ersetzt, da das aus den AIS-Daten ermittelte Geschwindigkeitsprofil nur begrenzt auf Motorboote übertragbar ist.

2.2.1 Methodik

Der Berechnungsablauf für die Ermittlung von Treibstoffverbrauch und Emissionen ist wie folgt:

1. Abschätzung von Widerstand und benötigter Antriebsleistung jedes Bootes mittels empirischer Modelle für alle Geschwindigkeiten im Geschwindigkeitsprofil.
2. Bestimmung von durchschnittlicher Geschwindigkeit und Leistungsbedarf durch Gewichtung gemäß des Geschwindigkeitsprofils für jedes Boot.
3. Zuteilung einer jährlichen Fahrdistanz zu jedem Boot gemäß dem ermittelten Nutzungsprofil nach dem Zufallsprinzip.
4. Berechnung der jährlichen Fahrtzeit aus Durchschnittsgeschwindigkeit und Jahresdistanz für jedes Boot.
5. Berechnung des jährlichen Energiebedarfs aus jährlicher Fahrtzeit und durchschnittlichem Leistungsbedarf für jedes Boot.
6. Berücksichtigung der Effizienz des installierten Antriebs zur Ermittlung der Eingangsenergiemenge (siehe Tabelle 2-3).
7. Bestimmung der jährlichen Triebstoffvolumina und CO₂-Emissionen aus Heizwerten und Emissionsfaktoren (siehe Tabelle 2-4).

2.2.1.1 Widerstandsschätzung

Es wurden zwei unterschiedliche empirische Widerstandsmodelle verwendet, um das gesamte Spektrum an Geschwindigkeiten abzudecken. Die Modelle wurden nach Erfahrung aus anderen Projekten und Verfügbarkeit der benötigten Eingabeparameter ausgewählt.

1. Methode nach Holtrop [8] für den Bereich der Verdrängerfahrt.
2. Methode nach Savitsky [9] mit Erweiterungen nach Blount und Fox [10] für den Bereich der Gleitfahrt.

Die für die Berechnungen mittels der o.g. Methoden benötigten Parameter wurden dabei wie folgt festgelegt:

1. Wasserlinienlänge
Die Wasserlinienlänge wurde auf 90% der Länge geschätzt.
2. Verdrängung
Es wurde das Verhältnis von Bootsänge zur Kubikwurzel der Verdrängung für die Registereinträge mit bekannter Masse gebildet. Diese Daten wurden jeweils mittels einer linearen, über die Bootsänge angepassten Näherungsfunktion getrennt nach Segelbooten und Motorbooten auf die restliche Flotte übertragen. Die Masse der zugelassenen Personenzahl wurde mit 80kg pro Person berücksichtigt.

3. Blockkoeffizient
Für Segelboote wurde der Blockkoeffizient auf 0,4 geschätzt. Für Motorboote wurde der Wert anhand der Abmessungen und der Verdrängung errechnet.
4. Breite
Die Breite wurde für aus dem Register übernommen. Bei resultierenden Hauptspantkoeffizienten (s.u.) unter 0,5 wurde die Breite angepasst, um einen Hauptspantkoeffizienten von min. 0,5 zu erreichen.
5. Tiefgang
Der Tiefgang wurde für Motorboote wenn möglich aus dem Register übernommen. Fehlende Daten wurden durch Anpassung einer linearen Näherungsfunktion an das Verhältnis von Länge zu Tiefgang über dem Verhältnis von Länge zur Kubikwurzel der Verdrängung in den bestehenden Daten ergänzt. Für Segelboote wurde der Rumpftiefgang ohne Anhänge anhand der Abmessungen, Verdrängung und Blockkoeffizient berechnet.
6. Benetzte Fläche
Die benetzte Fläche wurde anhand der Formel von Holtrop [11] geschätzt.
7. Prismatischer Koeffizient
Der prismatische Koeffizient wurde für Gleitrümpfe auf 0,7, für Verdrängerrümpfe auf 0,58 und für Segelboote auf 0,56 geschätzt [12].
8. Der Hauptspantkoeffizient ist der Quotient aus Blockkoeffizient und prismatischem Koeffizient.
9. Längenschwerpunkt des Auftriebs
Der Längenschwerpunkt des Auftriebs wird in als identisch mit dem Massenschwerpunkt LCG angenommen.
10. Längenschwerpunkt der Masse
Der Massenschwerpunkt wurde für Gleitrümpfe auf 40%, für Verdrängerrümpfe auf 45% und für Segelboote auf 46,5% der Strecke zwischen Heck und Bug angenommen [10], [12]. Der Massenschwerpunkt wurde für Gleitrümpfe auf 40%, für Verdrängerrümpfe auf 45% und für Segelboote auf 46,5% der Strecke zwischen Heck und Bug angenommen [10], [12].
11. Wasserlinienwinkel
Der Wasserlinienwinkel wurde anhand der Wasserlinienlänge, Breite und des prismatischen Koeffizienten abgeschätzt: $i_e = \tan^{-1} \left(\frac{B/2}{(1-c_p) \cdot LWL} \right)$
12. Kimmwinkel
Der Kimmwinkel wurde auf 25° geschätzt.
13. Getauchte Spiegelfläche
Die getauchte Spiegelfläche wurde auf den Wert null festgelegt, da dieser für jedes Boot individuelle Wert auf Basis der vorhandenen Daten nicht geschätzt werden konnte.
14. Heckformparameter
Der Heckformparameter wurde auf den Wert null festgelegt, da dieser für jedes Boot individuelle Wert auf Basis der vorhandenen Daten nicht geschätzt werden konnte.

Auf die berechneten Widerstände wurden folgende zusätzliche Margen aufgeschlagen, um weitere Effekte und Faktoren zu berücksichtigen:

1. Seegangsmarge
Mit den genutzten empirischen Widerstandsmodellen wird der sogenannte Glattwasserwiderstand prognostiziert. Die Seegangsmarge berücksichtigt zusätzliche Widerstände, die aus Seegang, Wind und z.B. Bewuchs resultieren und beträgt für Seeschiffe zwischen etwa 10-30% des Glattwasserwiderstandes [13]. Da Wind und Seegang auf einem Binnenrevier wie dem Bodensee im Vergleich mit dem Meer gering sind, wurde der Minimalwert von 10% angenommen.

2. Margen für Anhänge
 Anhänge müssen bei beiden verwendeten Modellen explizit modelliert werden. Die dafür benötigten Parameter sind aber nicht verfügbar, sodass der reine Widerstand des Rumpfes berechnet und der Widerstand durch Anhänge abgeschätzt wurde. Dafür wurden 2,5% des Glattwasserwiderstandes aufgeschlagen. Für Segelboote wurden noch einmal zusätzlich 20% aufgeschlagen, um zusätzliche Widerstände von Kiel bzw. Schwert und Ruder zu berücksichtigen.
3. Margen für zusätzlichen aerodynamischen Widerstand
 Die Methode nach Holtrop berücksichtigt einen Anteil aerodynamischen Widerstand. Wegen des Ursprungs der Methode orientiert sich dieser jedoch an Frachtschiffen und berücksichtigt nicht den aerodynamischen Widerstand eines Riggs auf Segelbooten. Für Segelboote wurde daher ein zusätzlicher Widerstand von 2,5% des Glattwasserwiderstandes aufgeschlagen. Die Methode nach Savitsky enthält keinen aerodynamischen Widerstand, der daher zusätzlich mit 5% des Glattwasserwiderstandes berücksichtigt wurde.

In der folgenden Tabelle 2-3 sind die Energieumwandlungseffizienzen für die unterschiedlichen Antriebe aufgelistet. Es handelt sich um sog. Tank-to-Wheel-Effizienzen, also Werte, die das Verhältnis von vom Motor abgegebener Energie zur während des Tank- bzw. Ladevorgangs zugeführten Energiemenge angeben. Für den Elektromotor enthalten diese Werte daher Verluste beim Laden, Speichern und Entladen [14]. Für die Verbrennungsmotoren wurde der 4-Takt-Benzinmotor als Referenz gewählt [15] und anschließend die Effizienzen des 2-Takt-Motors (etwas weniger effizient) und des Dieselmotors (etwa effizienter) festgelegt.

Tabelle 2-3: Energieumwandlungseffizienzen (Tank-to-Wheel) unterschiedlicher Motoren

Antriebsart	Effizienz
4-Takt Benzinmotor	30%
2-Takt-Benzinmotor	25%
Dieselmotor	35%
Elektromotor	65%

Die folgende Tabelle 2-4 zeigt die Emissionsfaktoren und Heizwerte der unterschiedlichen Energieträger [16].

Tabelle 2-4: Emissionsfaktoren und Heizwerte verschiedener Treibstoffe

Energieträger	Emissionsfaktor [g/kWh]	Heizwert [kWh/kg]
Benzin	264	12.00
Diesel	266	11.80
Strom (Strommix Deutschland)	366	-

2.2.2 Jährlicher Energieverbrauch und Emissionen

2.2.2.1 Szenario 1: Geschwindigkeitsprofile

Zur Ermittlung des jährlichen Treibstoffverbrauchs wurden die mit der dargestellten Methode ermittelten Verbrauchswerte der Sportboote mit den in der Vorgängerstudie ermittelten Angaben für die Behördenfahrzeuge und Berufsschifffahrt kombiniert. Dieser Ansatz wurde gewählt, da die Verbrauchswerte für diese beiden Kategorien in der Studie von Prof. Tillmetz auf Rückmeldungen der jeweiligen Schiffsbetreiber beruhen [2], die als zuverlässig eingestuft werden, da die Treibstoffmengen durch die Unternehmen nachverfolgt werden. Die folgende Abbildung 2-17 zeigt den jährlichen Treibstoffverbrauch der Bodenseeflotte aufgeteilt nach Motorbooten, Segelbooten, Behördenfahrzeugen und Passagierschiffen. Die einzelnen Kategorien sind jeweils zusätzlich nach Benzin- und Dieselanteilen unterteilt. Der jährliche Treibstoffverbrauch beträgt knapp 7600m³. Davon sind nur ca. 240m³ Benzin, der Rest ist mit einem Anteil von knapp 97% Dieseltreibstoff. Die Sportboote haben einen Anteil von 394m³ am gesamten Treibstoffverbrauch, wobei 218m³ (55,3%) auf Motorboote entfallen und 130m³ (44,7%) auf Segelboote. Diese Mengen sind zu gering, da sie deutlich unter den Abgabemengen der Seetankstellen liegen, über die allein in Bregenz und St. Gallen ca. 450m³ Benzin bzw. 220m³ Dieseltreibstoff verkauft werden [17]. Diese Beobachtung bestätigt die Vermutung, dass das für Motorboote ermittelte Fahrprofil, die den Großteil des Treibstoffverbrauchs unter den Sportbooten verursachen, nicht die tatsächliche Nutzung am Bodensee widerspiegelt, weshalb in dieser Studie ein zweites Szenario betrachtet wird (siehe 2.1.3.4).

Die größte Treibstoffmenge verbrauchen die Passagierschiffe mit einem Treibstoffvolumen von gut 6927m³, was einem Anteil von 91,5% entspricht.

Der Kraftstoffverbrauch der Segelboote ist vermutlich deutlich zu hoch geschätzt, da der Motor auf Segelbooten nur den Hilfsantrieb darstellt. Da keine entsprechenden Daten vorliegen, kann die Motornutzungszeit nur auf Basis eigener Erfahrungen geschätzt werden, die sich jedoch stark vom tatsächlichen Nutzungsverhalten unterscheiden kann. Daher wurde die Annahme getroffen von 100% Motornutzung bei Segelbooten auszugehen.

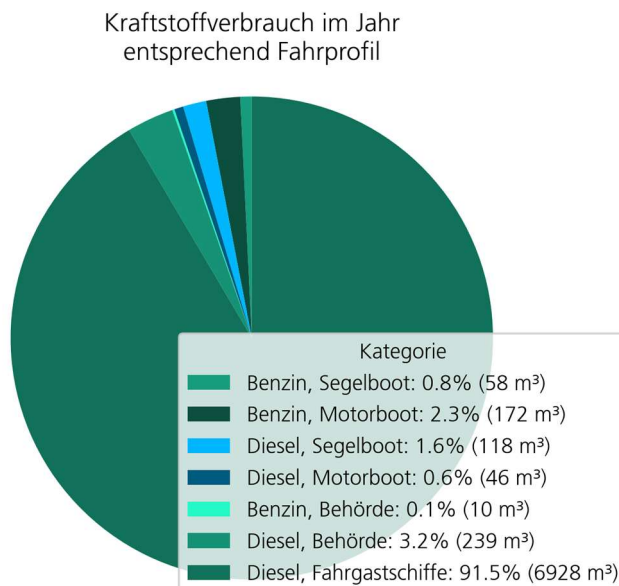


Abbildung 2-17: Geschätzter Kraftstoffverbrauch pro Jahr bei Anwendung der ermittelten Fahrprofile.

Die folgende Abbildung 2-18 zeigt die CO₂-Emissionen der Bodenseeflotte aufgegliedert nach Treibstoffarten. Die Gesamtemissionen betragen etwa 19693t. Die Emissionen werden beinahe vollständig (97,0%) durch die Verbrennung von Dieselmotoren verursacht. Knapp drei Prozent entfallen auf die Verbrennung von Benzin. Die Emissionen durch die elektrischen Antriebe betragen unter 0,2%. Die Emissionen werden hauptsächlich durch Diesel verursacht, da dieses der dominierende Treibstoff am Bodensee ist.

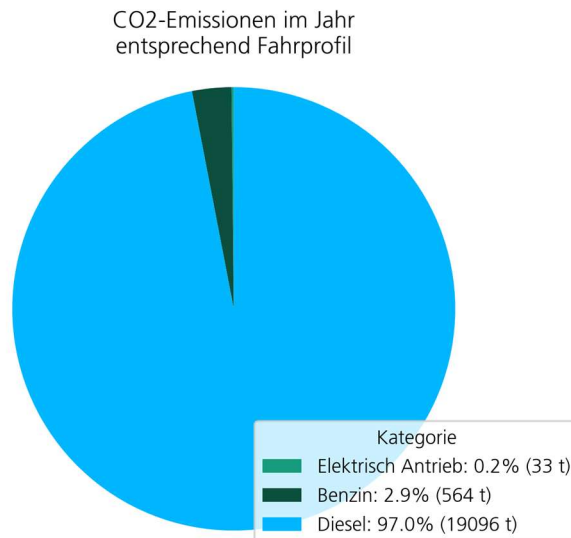


Abbildung 2-18: Geschätzte CO₂-Emissionen pro Jahr bei Anwendung der ermittelten Fahrprofile.

2.2.2.2 Szenario 2: Höchstgeschwindigkeit

Da die ermittelten Fahrprofile wie oben beschrieben mit Unsicherheiten behaftet und auf Motorboote nur eingeschränkt übertragbar sind, wurde ein zusätzliches Szenario analysiert. In diesem Szenario legen die Boote ihre jeweilige jährliche Distanz mit Höchstgeschwindigkeit zurück, um eine obere Grenze für den Kraftstoffverbrauch der Sportboote zu bestimmen. Die Höchstgeschwindigkeit wurde dabei wie folgt definiert:

1. Für Segelyachten Rumpfgeschwindigkeit (Froude'sche Zahl = 0,4)
2. Für Motorboote mit Verdrängerrumpf Rumpfgeschwindigkeit (Froude'sche Zahl = 0,4)
3. Für gleitfähige Motorboote 40km/h (Geschwindigkeitsbegrenzung am Bodensee)

In den Fällen, in denen die installierte Leistung geringer war als die zum Erreichen der Geschwindigkeit benötigte Leistung, wurde die volle Nutzung der installierten Leistung angenommen. Die Verbrauchsdaten von Berufs- und Behördenfahrzeugen wurden wieder aus der Vorgängerstudie übernommen.

Der Kraftstoffverbrauch der Bodenseeflotte für dieses Szenario mit Höchstgeschwindigkeit ist in der folgenden Abbildung 2-19 dargestellt. Der Gesamtverbrauch beträgt etwa 10693m³ und ist damit etwa 41% höher als bei Anwendung der Fahrprofile. Der größte Teil dieses Unterschieds kann auf die Verzehnfachung des Benzinverbrauchs auf etwa 2586m³ zurückgeführt werden. Der Anteil der Sportboote am Gesamtverbrauch steigt damit auf 32,9%, liegt aber weiter deutlich unter den Ergebnissen der Vorgängerstudie. Der Treibstoffverbrauch wird weiter durch die Berufsschifffahrt dominiert, die einen Anteil von zwei Dritteln am Gesamtverbrauch hat.

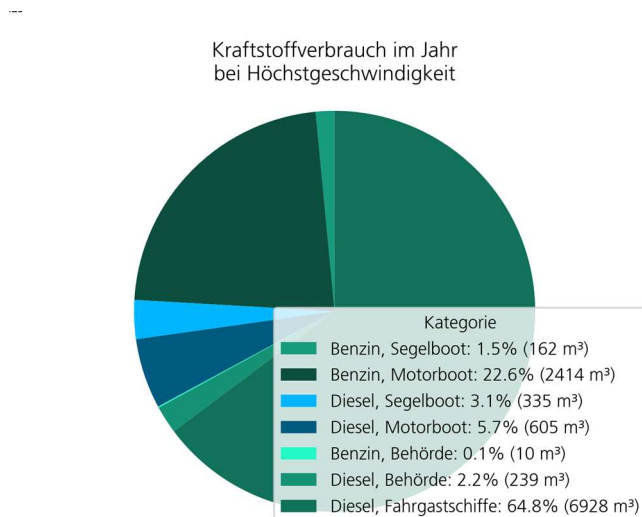


Abbildung 2-19: Geschätzter Kraftstoffverbrauch pro Jahr für Szenario Höchstgeschwindigkeit

Für das Szenario Höchstgeschwindigkeit wurden ebenfalls die CO₂-Emissionen bestimmt. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung 2-20 dargestellt. Die Gesamtemissionen betragen 27270t und liegen damit 38,5% über denen im Szenario mit Fahrprofilen. Über drei Viertel der Emissionen werden durch das Verbrennen von Dieselmotoren erzeugt. Der Anteil benzinbasierter Emissionen liegt bei 22,2%. Emissionen durch elektrische Antriebe betragen gut 0,3%.

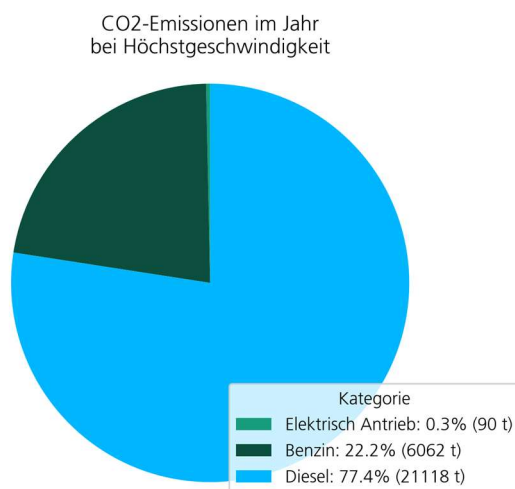


Abbildung 2-20: Geschätzte CO₂-Emissionen pro Jahr für Szenario Höchstgeschwindigkeit.

2.2.3 Effekt von Leistungsbeschränkungen

Die Auswirkung von Leistungsbeschränkungen wurden anhand des zweiten Szenarios untersucht, da die Effekte bei höheren Geschwindigkeiten deutlicher zutage treten. Zu diesem Zweck wurde die berechnete Leistung auf 500kW, 250kW und 100kW limitiert. Im ersten Schritt wurde gezählt wie viele Boote von der jeweiligen Leistungsbeschränkung betroffen wären, d.h. nicht mehr ihre jeweilige Höchstgeschwindigkeit erreichen können. Es bedeutet nicht, dass nicht mehr Boote einen kleineren Motor installieren müssten, weil die installierte Leistung zu groß wäre. Im zweiten Schritt wurde unter Berücksichtigung der limitierten Leistung der Energiebedarf ermittelt und mit dem Fall

ohne Leistungsbeschränkung verglichen. Die Änderung der Nutzungszeit durch eine ggf. verringerte Geschwindigkeit wurde über die Proportionalität der Leistung zur dritten Potenz der Geschwindigkeit abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 2-5 dargestellt. Vorausgesetzt, dass die geltende Geschwindigkeitsbegrenzung von 40km/h eingehalten wird, beträfe eine Leistungsbeschränkung auf 500kW nur sieben Boote. Der Energiebedarf bleibt praktisch unverändert. Bei einer Leistungsbeschränkung auf 250kW wären 173 Boote betroffen und der Energiebedarf und damit verbunden auch die Emissionen würden auf näherungsweise 99,5% sinken. Eine Begrenzung auf 100kW beträfe 2440 Boote und würde Energiebedarf und Emissionen in erster Näherung auf 92,8% senken.

Tabelle 2-5: Effekte absoluter Leistungsbeschränkungen

Leistungsbeschränkung	Boote mit verringerter Höchstgeschwindigkeit	Energiebedarf	Boote mit höherer installierter Leistung
500kW	7	100,0%	121
250kW	173	99,5%	1507
100kW	2440	92,8%	7954

Da eine absolute Leistungsbeschränkung vermehrt größere Boote trifft wurde außerdem eine Beschränkung auf ein Leistungsgewicht untersucht. Dazu wurden die Leistungsgewichte der gesamten Flotte berechnet und das Leistungsgewicht für eine Reihe von Perzentilen ermittelt. Das jeweils zugehörige Leistungsgewicht wurde dann zurück auf die Flotte übertragen und wiederum anhand des Höchstgeschwindigkeitsszenarios die Anzahl der betroffenen Boote sowie die näherungsweise Energieeinsparung berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 2-21: geschätzter Energiebedarf und Anzahl betroffener Boote für per Leistungsgewicht definierte Leistungsbeschränkungen dargestellt, die das Verhältnis des Energiebedarfs mit Leistungsbeschränkung zum Energiebedarf ohne Beschränkung sowie die Anzahl der betroffenen Boote als Funktion des Leistungsgewichts zeigt. Bei einem Leistungsgewicht nahe null ist der Energiebedarf knapp 11% des Referenzbedarfs. Beinahe alle Boote sind von der Einschränkung betroffen. Mit steigendem zulässigen Leistungsgewicht steigt auch der Energiebedarf an. Bis zu einem Leistungsgewicht von ca. 38,5W/kg steigt der Energiebedarf auf 99% des Referenzwertes. Dies ist also das maximale Leistungsgewicht, das Einfluss auf den Energiebedarf und damit die Emissionen hat. Das Leistungsgewicht von 38,5W/kg entspricht dem 58. Perzentil, was bedeutet, dass eine große Zahl an Booten auf dem Bodensee mehr Motorleistung hat, als für das Erreichen der jeweiligen Höchstgeschwindigkeit notwendig wäre. Die Anzahl der von einer Reduzierung ihrer Höchstgeschwindigkeit betroffenen Boote sinkt mit zunehmendem Leistungsgewicht zunächst stark, zwischen 4,7W/kg und 33,9W/kg vorübergehend schwächer, dann wieder stark, bis bei einem Wert von 43,5W/kg noch ca. 2500 Boote von einer reduzierten Höchstgeschwindigkeit betroffen sind. Danach nähert sich der Verlauf langsam der Nulllinie an. Die Kurve für die Anzahl der von einer Reduktion der installierten Leistung betroffenen Boote ähnelt zunächst der Kurve der von einer reduzierten Höchstgeschwindigkeit betroffenen Boote. Ab einem Leistungsgewicht von ca. 36,0W/kg unterscheidet sich der Kurvenverlauf dann deutlich. Die Zahl der von einer Reduktion der Motorleistung betroffenen Boote nimmt ab diesem Punkt weiter linear ab, bis das Leistungsgewicht von 105W/kg erreicht ist und nimmt danach etwas schwächer ab bis auch hier die Nulllinie erreicht ist.

Ein Nachteil der Regulierung per Leistungsgewicht ist, dass dadurch falsche Anreize gesetzt werden können, da es Bootseigner motivieren könnte die Masse ihrer Boote zu erhöhen, anstatt die Motorleistung zu reduzieren. Dadurch würden Treibstoffverbrauch

und Emissionen am Ende sogar wachsen. Die Erhebung und Kontrolle der Bootsmassen stellen darüber hinaus eine Herausforderung in der praktischen Umsetzung dar.

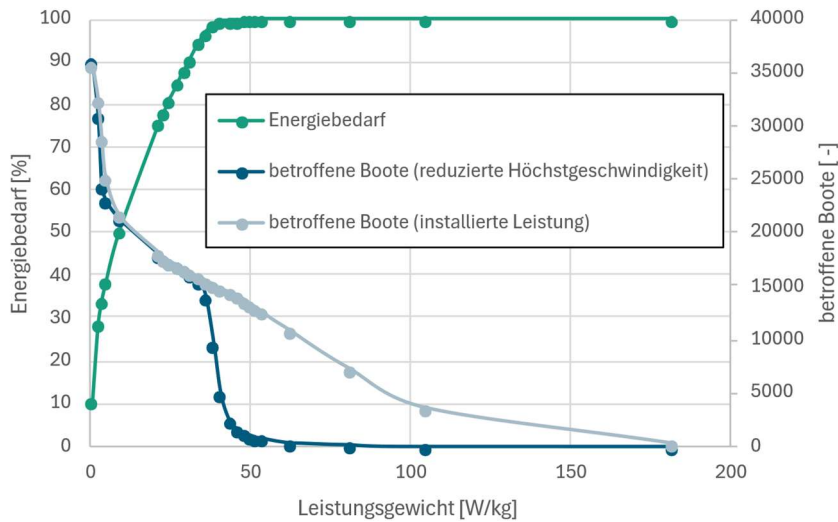


Abbildung 2-21: geschätzter Energiebedarf und Anzahl betroffener Boote für per Leistungsgewicht definierte Leistungsbeschränkungen

2.2.4 Eignung Elektroantrieb

Abbildung 2-22 zeigt die derzeitige Verbreitung von Elektromotoren in der Sportbootflotte des Bodensees. Insgesamt sind etwas mehr als 2000 Boote oder ca. 6% der Flotte bereits mit einem Elektromotor ausgestattet. Gemessen am Anteil an der jeweiligen Kategorie ist die Verbreitung unter den Segelbooten mit 13% deutlich höher als bei den Motorbooten, wo sie nur 3% beträgt.

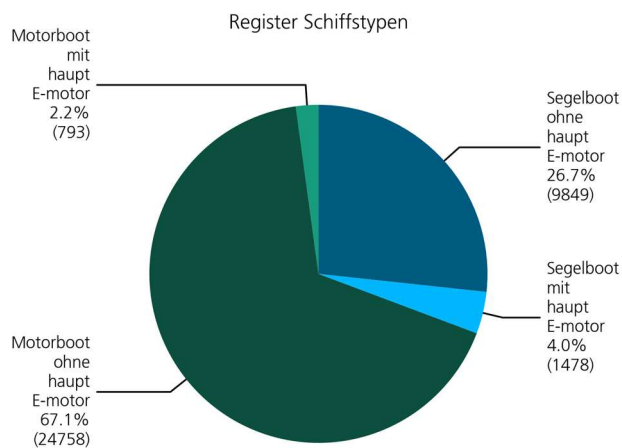


Abbildung 2-22: Anteil von Motorbooten und Segelbooten mit und ohne E-motor in den Schiffsregistern des Bodensees.

In Kapitel 2.1.3.4 wurden relevante Tagesdistanzen von etwa 58.5km und 60.4km für Pleasure Craft bzw. Sailing Vessels bestimmt. Anhand dieser Distanzen wurden Fahrzeit und elektrischer Energiebedarf für einen Tag für jedes Boot bestimmt. Zur Ermittlung der benötigten Batteriekapazität wurde zusätzlich die maximale Entladungstiefe für Batterien mit 80% angenommen, d.h. es wird davon ausgegangen, dass 80% der

Batteriekapazität nutzbar sind. Weiterhin wurde berücksichtigt, dass die Kapazität von Batterien mit der Zeit abnimmt und die Batterie somit größer dimensioniert werden muss, um auch am Ende ihrer Lebenszeit noch die geforderte Energiemenge zur Verfügung stellen zu können. Es wurde angenommen, dass die Batterie am Gebrauchsende noch 80% der Nennkapazität hat. Beide Effekte zusammen ergeben einen Faktor von 1,56 um den die Batteriekapazität den Energiebedarf übersteigen muss. Die erste Abbildung 2-23 stellt die Ergebnisse auf Basis der ermittelten Geschwindigkeitsprofile gemäß Abbildung 2-9 dar. Die Grafik zeigt, wie häufig bestimmte Batteriekapazitäten innerhalb der Sportbootflotte benötigt werden, wenn diese die jeweilige Tagesdistanz mit dem ermittelten Geschwindigkeitsprofil zurücklegen. Es ist zu sehen, dass kleine Kapazitäten unter 4kWh von etwa 6500 Booten benötigt werden. Kapazitäten zwischen 4kWh und 10kWh sind für knapp 13500 Booten erforderlich. Größere Kapazitäten werden zunehmend seltener benötigt. Die durchschnittlich benötigte Batteriekapazität beträgt 14,75kWh, die für 22795 Boote und damit über 60% der Sportbootflotte ausreichend ist. Es gibt aber auch ca. 2250 Boote mit einem Bedarf für Batterien mit einer Kapazität größer 36kWh.

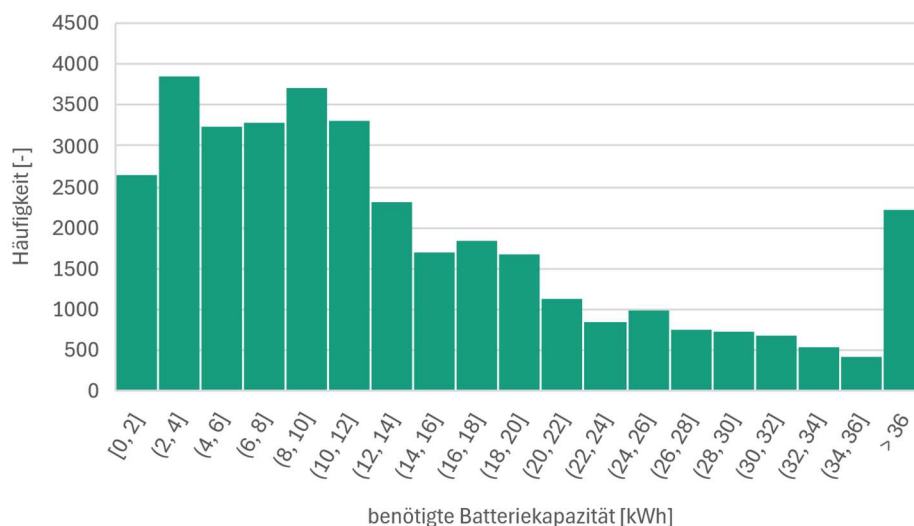


Abbildung 2-23: Häufigkeit benötigter Batteriekapazitäten für Tagesdistanz bei Anwendung des Geschwindigkeitsprofils

Die nächste Abbildung zeigt den Bedarf an Batteriekapazitäten, wenn die jeweilige Tagesdistanz durchgehend mit Höchstgeschwindigkeit zurückgelegt wird. Durch die höheren Geschwindigkeiten steigen die benötigten Kapazitäten an. Eine Batteriekapazität von max. 14,75kWh reicht dennoch, um den jeweiligen Energiespeicherbedarf von 2753 Booten zu decken, was die derzeitige Verbreitung als Primärtrieb am Bodensee übertrifft. Die doppelte Kapazität von 29,5kWh wäre ausreichend für knapp 8644 Boote, was knapp einem Viertel der Sportbootflotte am Bodensee entspricht. Während eine Kapazität von 36kWh bei Anwendung der Fahrprofile für fast 94% der Sportboote ausreicht, sind es bei Höchstgeschwindigkeit nur noch gut ein Viertel. Der Unterschied zwischen den beiden Fahrprofilen verdeutlicht den großen Einfluss der Geschwindigkeit auf die benötigte Batteriekapazität.

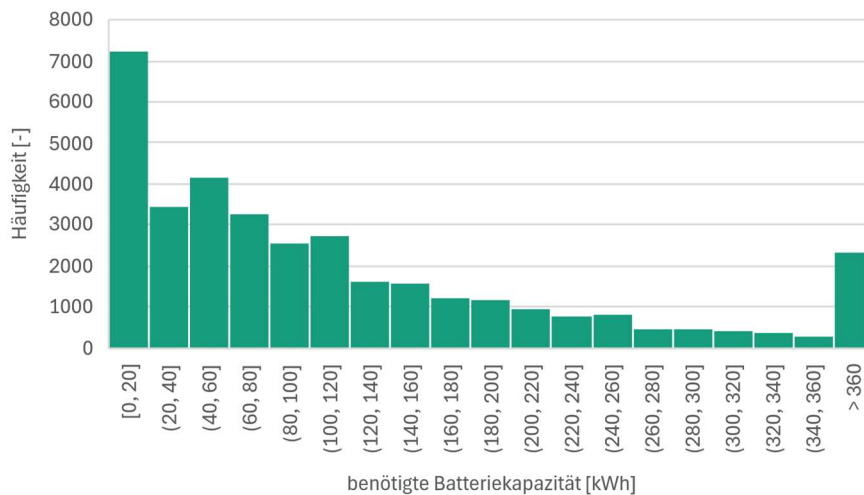


Abbildung 2-24: Häufigkeit benötigter Batteriekapazitäten für Tagesdistanz bei Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit

Zum besseren Verständnis sind in Tabelle 2-6 exemplarisch die (Durchschnitts-)Geschwindigkeiten und beispielhafte Energiebedarfe für eine Tagesdistanz für ausgewählte Größen von Motorbooten am Bodensee aufgeführt. Die Geschwindigkeit v_1 entspricht dabei der Durchschnittsgeschwindigkeit bei Anwendung des Geschwindigkeitsprofils und die Geschwindigkeit v_2 entspricht der Höchstgeschwindigkeit.

Tabelle 2-6: Exemplarische (Durchschnitts-)Geschwindigkeiten und elektrische Energiebedarfe für eine Tagesdistanz für ausgewählte Motorbootgrößen am Bodensee

L [m]	Tagesdistanz [km]	$\varnothing F_{n1}$ [-]	$\varnothing v_1$ [km/h]	Batteriekapazität ₁ [kWh]	F_{n2} [-]	v_2 [km/h]	Batteriekapazität ₂ [kWh]
5,0	58,5	0,236	5,96	5,86	1,59	40,0	103,4
6,1	58,5	0,236	6,58	8,40	1,44	40,0	145,8
8,5	58,5	0,236	7,77	22,6	1,22	40,0	375,0
12,9	58,5	0,236	9,57	59,6	0,99	40,0	865,3

Die folgende Tabelle Tabelle 2-7 listet entsprechende Daten für die Kategorie der Segelboote auf.

Tabelle 2-7: Exemplarische (Durchschnitts-)Geschwindigkeiten und elektrische Energiebedarfe für eine Tagesdistanz für ausgewählte Segelbootgrößen am Bodensee

L [m]	Tagesdistanz [km]	$\varnothing F_{n1}$ [-]	$\varnothing v_1$ [km/h]	Batteriekapazität ₁ [kWh]	F_{n2} [-]	v_2 [km/h]	Batteriekapazität ₂ [kWh]
7,5	60,4	0,228	7,04	16,09	0,4	12,35	43,7
8,2	60,4	0,228	7,37	23,6	0,4	12,92	75,7
10,5	60,4	0,228	8,33	36,7	0,4	14,61	112,4
12,6	60,4	0,228	9,13	56,9	0,4	16,01	178,0

„In Bezug auf die kommerzielle Schifffahrt verkehren in Norwegen 68 batterieelektrische Fähren im Pendelverkehr auf 65 Routen [18]. In Dänemark verbindet die vollelektrische Fähre Ellen die Insel Sjøby mit den Inseln Fünen und Alsens über eine Distanz von bis zu 40,7km [17]. Auf der Route zwischen Helsingør und Helsingborg in Schweden pendeln die Hybridfähren Tycho Brahe und Aurora, deren Batterien und Ladeinfrastruktur aber für vollelektrischen Betrieb ausgelegt sind, sodass die Dieselgeneratoren nur als Redundanz benötigt werden. Die Fähren hatten ursprünglich einen dieselelektrischen Antrieb und wurden 2018 umgerüstet [19]. Die Batteriekapazitäten wurden seit dem Umbau erhöht [20]. Diese Beispiele zeigen, dass für Fähren im Pendelverkehr ein vollelektrischer Betrieb über für den Bodensee relevante Strecken und auch Umbauten möglich sind. Zwei weitere Fähren mit einer Länge von jeweils 129m befinden sich derzeit im Bau [21]. Ein Beispiel für ein batterieelektrisch betriebenes Ausflugsschiff ist die Future of the Fjords, bei der 2018 ein Katamaranentwurf in Leichtbauweise umgesetzt wurde [22]. Mittlerweile existiert ein Schwesterschiff [23].

Die Vielzahl der Umsetzungen und der langjährige operative Betrieb elektrischer Fähren in ggü. dem Bodensee herausfordernden Gewässern (Strömung, Wellengang, Eisgang) zeigt die technische und operative Machbarkeit elektrischer Antriebe in der Praxis auf. Der Elektroantrieb ist daher technisch auch für die Berufsschifffahrt auf dem Bodensee geeignet.

2.3 Initiale Dekarbonisierungsalternativen

Auf Basis der Ergebnisse wurden folgende Antriebsarten als initiale Dekarbonisierungsalternativen ausgewählt:

1. Batterieelektrischer Antrieb
2. Brennstoffzellenhybridantrieb

Der Batterieelektrische Antrieb wurde gewählt, da er schon in geringem Umfang (ca. 6%) als Primärtrieb innerhalb der Bootsflotte am Bodensee eingesetzt wird. Für einen Teil der Bootseigner scheint diese Antriebsart also für ihre individuelle Nutzung völlig ausreichend zu sein. Weiterhin wurde festgestellt, dass für die ermittelten Fahrprofile etwa zwei Drittel der Bodenseeflotte rein batterieelektrisch betrieben werden könnten. In dieser Studie soll diese Antriebsart daher weiter untersucht werden, um eine mögliche Steigerung der Verbreitung zu untersuchen.

Der Brennstoffzellenhybridantrieb wurde ausgewählt, da der Treibstoffverbrauch am Bodensee durch die Passagierschifffahrt dominiert wird. Während Beispiele für batterieelektrische Antriebe für Fähren im Pendelverkehr existieren (siehe Kapitel 2.2.4), wird davon ausgegangen, dass die mit diesem Antrieb erzielbare Reichweite für Ausflugsschiffe ggf. nicht ausreicht und erweitert werden muss. Dies gilt insbesondere, wenn bestehende Schiffe umgerüstet werden sollen und z.B. nicht gleichzeitig auch ein Leichtbauansatz verfolgt werden kann. Weiterhin zeigen die Ergebnisse zur Eignung des Elektroantriebs, dass es auch eine nicht zu vernachlässigende Zahl an Booten gibt, die sehr große Batteriekapazitäten benötigen würden., für die der Hybridantrieb ebenfalls relevant wäre. Da der Bodensee auch als Trinkwasserreservoir genutzt wird, kommt z.B. Ammoniak als Kraftstoff nicht in Frage und auch Methanol erscheint vor diesem Hintergrund keineswegs eine sichere Alternative zu sein.

2.4 Zusammenfassung AP1

Dieses Arbeitspaket die Beantwortung der drei folgenden Leitfragen zum Ziel:

- A. Leitfrage 7: Darstellung des Kraftstoffverbrauchs der jeweiligen Schiffstypen mit anwendungsorientierten Fahrprofilen.
- B. Leitfrage 8: Ist eine Leistungsbeschränkung im Hinblick auf eine CO₂-Einsparung in der Frei-zeitschiffahrt zielführend? Zu betrachten sind Leistungsbeschränkungen ab 100, 250 und 500 kW. Zudem ist zu ermitteln, inwiefern eine Leistungsbeschränkung auf ein bestimmtes Verhältnis kW/kg im Sinne einer CO₂-Reduzierung einen Effekt haben kann.
- C. Leitfrage 1: Die Machbarkeitsstudie von Herrn Prof. Tilmetz geht davon aus, dass batterie-elektrische Antriebe nur für kurze Strecken und langsames Fahren sinnvoll sind. Die Umstellung auf Elektroantriebe soll näher untersucht werden.

In AP1 wurden AIS-Daten von Revieren analysiert, die dem Bodensee ähneln, um realistische Fahrprofile entsprechend **Leitfrage 7** zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden Geschwindigkeitsprofile für die beiden AIS-Schiffskategorien Sailing Vessel und Pleasure Craft ermittelt und dargestellt. Weiterhin wurden Nutzungsprofile in Form von Häufigkeiten von im Jahresverlauf zurückgelegten Distanzen erarbeitet und dargestellt. Zusammen bilden Geschwindigkeitsprofile und Nutzungsprofile die Fahrprofile, wobei Sailing Vessel mit Segelbooten und Pleasure Craft mit Motorbooten assoziiert wurden.

Anschließend wurden auf Basis der Fahrprofile mittels empirischer Modelle Treibstoffverbrauch und Emissionen der Sportbootflotte ermittelt. Der Treibstoffverbrauch Die Gesamtemissionen betragen für diesen Fall etwa 19693t, wovon ca. 5% auf die Sportbootflotte entfallen. Die berechneten Verbräuche und Emissionen liegen dabei deutlich unter den Ergebnissen der Vorgängerstudie. In dieser Studie werden Treibstoffverbrauch und Emissionen am Bodensee hauptsächlich durch die Berufsschiffahrt und nicht durch die Sportschiffahrt verursacht.

In einem zweiten Szenario wurde eine Obergrenze für Treibstoffverbräuche und Emissionen anhand der individuellen Höchstgeschwindigkeit für jedes Boot ermittelt. In diesem Szenario betragen die Gesamtemissionen etwa 27270t wovon etwa ein Drittel durch die Sportschiffahrt verursacht werden.

Anhand des zweiten Szenarios wurde auch der Effekt von Leistungsbeschränkungen gemäß **Leitfrage 8** untersucht. Absolute Leistungsbeschränkungen auf 500kW und 250kW haben nahezu keinen Effekt auf die Emissionen. Eine Leistungsbeschränkung auf 100kW würde den Energiebedarf und damit die Emissionen grob geschätzt um ca. 7,2% verringern. Weiterhin wurde eine Leistungsbeschränkung mittels eines Leistungsgewichtes untersucht und festgestellt, dass eine Beschränkung auf über 38,5W/kg keinen Einfluss auf die Emissionen erwarten lässt. Weiterhin wurde festgestellt, dass viele Boote am See übermotorisiert sind.

Die Eignung von batterieelektrischen Antrieben für die Sportbootflotte zur Beantwortung von **Leitfrage 1** wurde ebenfalls untersucht, wobei sowohl die ermittelten Fahrprofile als auch das Höchstgeschwindigkeitsszenario zugrunde gelegt wurden. Für den Fall mit Fahrprofilen wurde festgestellt, die durchschnittlich benötigte Batteriekapazität 14,75kWh beträgt und diese Kapazität für über 60% der Flotte für das Zurücklegen einer Tagesdistanz von ca. 60km ausreichen würde. Im Höchstgeschwindigkeitsszenario wäre diese Kapazität nur noch für etwa 2750 Boote ausreichend. Die derzeitige Verbreitung liegt aber unter diesem Wert und die Installation größerer Kapazitäten wäre möglich, um auch höhere Bedarfe zu decken. Insgesamt zeigen die Daten für Sportboote eine starke Abhängigkeit der benötigten Batteriekapazität von der Fahrtgeschwindigkeit. Bei langsamer Fahrt können aber auch längere Strecken mit Elektroantrieb zurückgelegt werden. In Bezug auf die Umstellung auf Elektroantriebe sind in den

...skandinavischen Ländern bereits über 70 Fähren, darunter auch Umbauten, in Betrieb, Tendenz steigend. Es wurden nur zwei entsprechende Ausflugsschiffe identifiziert, bei denen es sich um Neubauten in Leichtbauweise handelt.

Zuletzt wurden auf Basis der Ergebnisse des Arbeitspaketes die initialen Dekarbonisierungsalternativen abgeleitet. Die näher zu untersuchenden Antriebe sind der batterieelektrische Antrieb und der Brennstoffzellenhybridantrieb.

3 AP2: Kraftstoffalternativen und Infrastruktur

Zur Erreichung einer klimaneutralen Bodenseeschifffahrt ist die Umstellung auf nachhaltige Energieträger und Antriebssysteme erforderlich. Im Fokus stehen Wasserstoff, Methanol und Ammoniak als potenzielle Kraftstoffe, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an Speicherung, Infrastruktur und Betriebssicherheit stellen. Ergänzend werden Antriebstechnologien untersucht, die von modifizierten Verbrennungsmotoren über hybridelektrische Konzepte bis hin zu rein elektrischen Systemen reichen. Anschließend wird hydriertes Pflanzenöl (HVO, engl.: Hydrotreated Vegetable Oil) als mögliche Alternative zur direkten Substitution von Dieselmotoren betrachtet.

Ziel dieses Kapitels ist es, die technologischen Optionen hinsichtlich Energieeffizienz, Emissionsreduktion, Umweltgefährdung und technischer Umsetzbarkeit für den spezifischen Einsatz im Bodenseeraum zu bewerten. Zunächst werden die betrachteten Energieträger hinsichtlich ihrer Spezifikationen, Besonderheiten und Gefahrenpotenziale eingeordnet und bewertet. Zudem werden die Kosten alternativer Energieträger sowie elektrischer Energie den konventionellen Kraftstoffen gegenübergestellt.

Im nächsten Schritt werden klimaneutrale Antriebskonzepte diskutiert und hinsichtlich ihrer Eignung für die Bodenseeschifffahrt eingeordnet. Darauf aufbauend erfolgt eine qualitative Bewertung der Antriebssysteme unter den Gesichtspunkten technischer Umsetzbarkeit, Verfügbarkeit, Umwelteinwirkungen sowie der Kosten für Umrüstung und Betrieb. Anschließend wird die erforderliche landseitige Infrastruktur betrachtet, wobei verschiedene Betankungskonzepte einbezogen werden. Hierbei stehen insbesondere Verfügbarkeit, Sicherheit und Kosten im Vordergrund.

Für den Energieträger HVO wird diese Analyse gesondert durchgeführt, da er ohne größere Umrüstungen eingesetzt werden kann und theoretisch bereits kurzfristig einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten könnte.

Im Anschluss werden die Ergebnisse der einzelnen Unterkapitel zusammen mit den Erkenntnissen aus dem Arbeitspaket 1 in Verbindung gesetzt und eine Eignungsbewertung der unterschiedlichen Kraftstoffe und Antriebssysteme für den Einsatz am Bodensee durchgeführt.

3.1 Einordnung der ausgewählten klimaneutralen Energieträger

3.1.1 Klassifizierung der Energieträger

In diesem Abschnitt werden die für die Bodenseeschifffahrt relevanten klimaneutralen Energieträger vorgestellt und eingeordnet. Betrachtet werden Wasserstoff, Methanol, Ammoniak sowie HVO. Die Klassifizierung erfolgt anhand zentraler Eigenschaften wie Herstellungspfad, Energie- und Stoffeigenschaften, Lager- und Transportfähigkeit sowie ökologische Auswirkungen. Ziel ist es, die spezifischen Potenziale und Einschränkungen dieser Energieträger für eine klimaneutrale Nutzung im schifffahrtlichen Kontext systematisch darzustellen.

3.1.1.1 Wasserstoff

Wasserstoff wird als vielversprechender Kraftstoff in der zukünftigen Schifffahrt gehandelt. Grund dafür liegt in der möglichen emissionsfreien Herstellung und energetischen Umsetzung von Wasserstoff. Wenn Wasserstoff, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, durch Elektrolyse und den Einsatz von erneuerbaren Energien erzeugt wird, wird dieser als grün betitelt und ist mit keinen Emissionen verbunden.

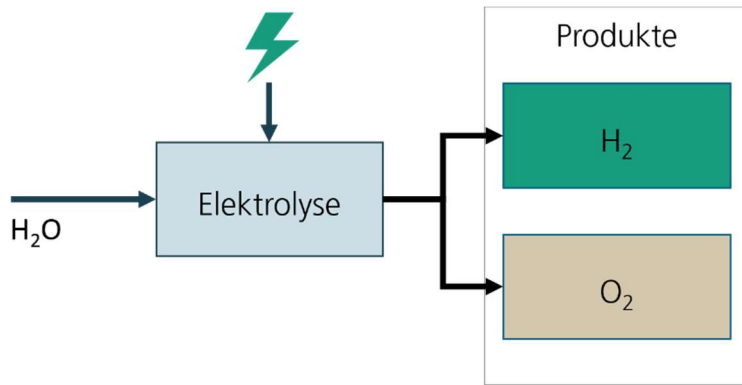


Abbildung 3-1: Herstellungsrouten von grünem Wasserstoff

Die effizienteste und emissionsfreie Nutzung von Wasserstoff zur Energierückgewinnung erfolgt in einer Brennstoffzelle, da dabei lediglich Wasser als Reaktionsprodukt entsteht. Alternativ kann Wasserstoff in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen und des Luftüberschusses ist dabei jedoch mit Stickoxid-Emissionen (NO_x) zu rechnen. Zudem erfordern die spezifischen Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff entweder umfangreiche Modifikationen bestehender Motoren oder den Einsatz neu dafür entwickelter Komponenten. [24]

Die größte Herausforderung beim Einsatz von Wasserstoff in der Schifffahrt ist die geringe volumetrische Energiedichte. Um diese zu erhöhen wird Wasserstoff entweder unter Druck bei 300 bis 700 bar oder im verflüssigten Zustand bei -253°C gespeichert. Durch diese Speichertechnologien wird die Bereitstellung von Wasserstoff komplex, weshalb sowohl der Preis als auch das benötigte Volumen für die Speichertechnologien hoch sind. Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte und den damit verbundenen Herausforderungen ist Wasserstoff vor allem für stationäre Anwendungen geeignet und ist im maritimen Sektor bisher nur für kurze Strecken und kleinere Leistungsklassen technisch sinnvoll einsetzbar. [24], [25]

3.1.1.2 Methanol

Methanol, bzw. Methylalkohol ist eine organische Verbindung mit der Summenformel CH_3OH . Aufgrund des Kohlenstoffs in der Zusammensetzung wird bei der Verbrennung von Methanol weiterhin Kohlenstoffdioxid (CO_2) freigesetzt. Dennoch kommt es beim Einsatz in Verbrennungsmotoren im Vergleich zu konventionellen Marinekraftstoffen zu einer Reduktion von CO_2 -, Schwefeloxid- (SO_x), Stickoxid- (NO_x) und Feinstaubemissionen. Aktuell wird Methanol hauptsächlich aus Erdgas hergestellt [26]. Werden die Emissionen aus der konventionellen Herstellung und Verbrennung zusammen betrachtet, hat Methanol bei der Herstellung aus Erdgas gleichwertige oder höhere CO_2 -Emissionen als konventionelle Schiffs-kraftstoffe im gesamten Lebenszyklus [27].

Dennoch kann Methanol durch Produktion aus grünem Wasserstoff und CO_2 aus der Luft klimaneutral produziert werden. Abbildung 3-2 zeigt die nachhaltige Herstellung mit grünem Wasserstoff und CO_2 aus Carbon-Capture (Abscheidung von Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre). Dadurch wird bilanziell gesehen dieselbe Menge Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entnommen, die bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus (Herstellung & Verbrennung) entstehen dadurch keine zusätzlichen Emissionen. Alternativ kann Methanol beispielsweise biogen aus Biomasse und grünem Wasserstoff hergestellt werden, was jedoch hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit aufgrund der geringen Effizienz und Verfügbarkeit derzeit keine vielversprechende Rolle spielt.

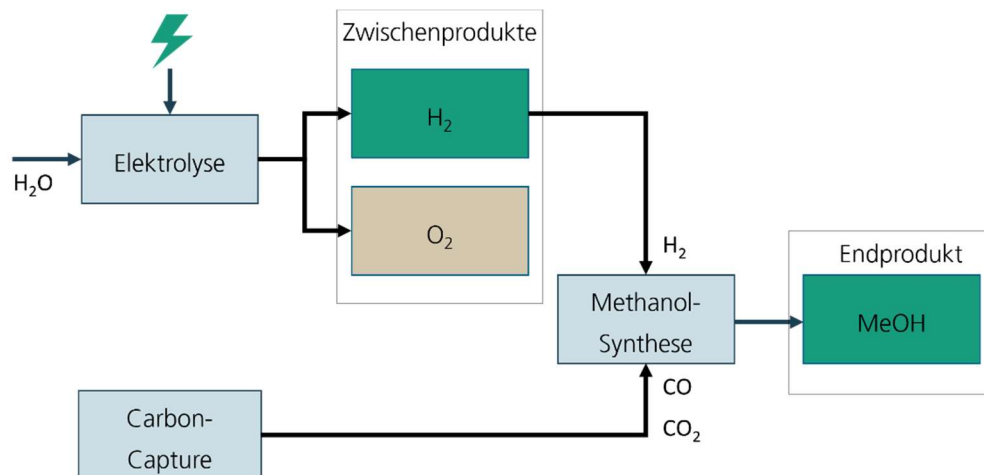


Abbildung 3-2: Herstellung von Methanol mit CO / CO_2 aus Carbon Capture und grünem Wasserstoff

Für den Einsatz von Methanol in herkömmlichen Verbrennungsmotoren sind vor allem Anpassungen am Kraftstoffsystem (korrosions- und verschleißfeste Pumpen, Leitungen, Düsen) sowie an der Zünd- und Einspritztechnik erforderlich, da Methanol eine geringe Schmierfähigkeit, einen niedrigeren Heizwert und eine deutlich höhere Zündtemperatur als Diesel aufweist. In der Praxis wird daher häufig ein Dual-Fuel-Konzept mit Pilotdiesel oder eine Umrüstung auf Fremdzündung mit Zündkerzen gewählt, um eine zuverlässige Verbrennung sicherzustellen [28].

Methanol kann zudem beispielsweise in Hochtemperatur-Brennstoffzellen (DMFC, engl.: Direct Methanol Fuel Cells) oder Niedertemperatur-Brennstoffzellen mit vorgeschalteter Methanol-Reformierung – Spaltung des Methanol-Moleküls in Wasserstoff und CO / CO_2 – eingesetzt werden. Dies führt zu einer Erhöhung der Komplexität des Antriebssystems und befindet sich derzeit für größere Leistungsklassen noch in den frühen Phasen der Entwicklung [29].

Methanol ist unter Normalbedingungen im flüssigen Zustand und ist im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Kraftstoffen einfach in der Handhabung. Bereits jetzt besteht ein weltweites Handelsnetzwerk für Methanol, sodass auf bestehende Infrastruktur und Erfahrungen bei der Hochskalierung zurückgegriffen werden kann. Die Herausforderung von Methanol liegt in der geringen gravimetrischen Energiedichte, die erhöhte Tankgrößen erfordern.

Darüber hinaus ist Methanol eine toxische, korrosive und brennbare Flüssigkeit [25]. Methanol ist vollständig wasserlöslich und verteilt sich nach einem Austritt sofort im gesamten Wasserkörper. Dadurch ist eine Eindämmung oder mechanische Entfernung wie für Diesel / Benzin nicht möglich. Zwar ist Methanol toxisch für Mensch und Umwelt, wird jedoch im Vergleich zu Diesel oder Ammoniak biologisch relativ schnell abgebaut. Für ein Trinkwasserreservoir wie den Bodensee stellt ein Methanolaustritt dennoch ein erhöhtes Risiko dar, da bereits moderate Konzentrationen die Wasserqualität erheblich beeinträchtigen können. Für die Nutzung als Schiffskraftstoff werden erhöhte Sicherheitsmaßnahmen für die Handhabungen benötigt.

3.1.1.3 Ammoniak

Ammoniak gilt aufgrund seiner kohlenstofffreien Herstellung und Nutzung als vielversprechender alternativer Kraftstoff. Bei der Verbrennung entstehen keine CO_2 -Emissionen, jedoch können erhöhte Mengen an Stickoxiden (NO_x) und Distickstoffmo-

nitroxid (N_2O) freigesetzt werden, wodurch der Einsatz geeigneter Abgasnachbehandlungssysteme erforderlich ist [13,16]. Aufgrund langsamer Flammgeschwindigkeit und einer hohen Zündtemperatur ist die stabile Verbrennung von Ammoniak in Motoren eine technische Herausforderung [13]. Ähnlich wie bei Methanol wäre ein Einsatz in Dualkraftstoff-Motoren denkbar.

Damit Ammoniak zukünftig emissionsfrei hergestellt werden kann, muss die Produktion – wie in Abbildung 3-3 dargestellt – auf Basis von grünem Wasserstoff und unter Einsatz von erneuerbaren Energien geschehen.

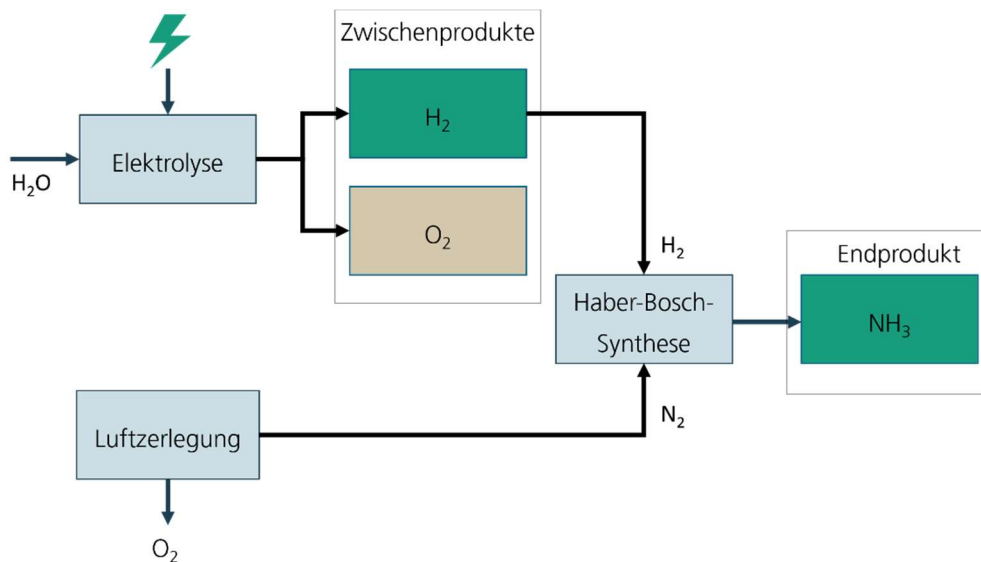


Abbildung 3-3: Herstellung von Ammoniak aus grünem Wasserstoff und Stickstoff aus Luftzerlegung

Ammoniak ist unter Normbedingungen (1 bar, 20 °C) im gasförmigen Zustand. Ammoniak besitzt im drucklosen Zustand eine geringe volumetrische Energiedichte. Um dem entgegenzuwirken kann Ammoniak verflüssigt werden. Das geschieht entweder druckbeaufschlagt bei etwa 10 bar und 20°C oder durch herunterkühlen auf –33 °C. Aufgrund seiner bereits etablierten Nutzung in der Düngemittelindustrie, wo Ammoniak weltweit gehandelt und transportiert wird, kann bei der Verteilung und dem Einsatz als Schiffskraftstoff auf bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden. [24], [30]

Das größte Risiko beim Einsatz von Ammoniak liegt in seiner Toxizität. Bereits geringe Konzentrationen in der Umgebungsluft können gesundheitliche Schäden bei Menschen sowie negative Umwelteinwirkungen verursachen. Tritt eine Leckage im Tanksystem auf, verdampft das flüssige Ammoniak und bildet eine Gaswolke. Die Aufnahme erfolgt überwiegend über die Atemwege, wobei Ammoniak dort stark reizend wirkt. Zusätzlich kann es Augen und Haut schädigen. Starker Kontakt führt zu Verätzungen oder sogar Erblindung und in hohen Konzentrationen wirkt Ammoniak tödlich [31].

Wie bereits erwähnt kommt es beim Austritt vom Ammoniak zu einem Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand. Ammoniak besitzt ein Expansionsverhältnis von 850, sodass ein Liter flüssiger Ammoniak 170 m³ für Menschen giftiges Ammoniakgas erzeugen [32]. Daher muss bei einem Austritt an Bord von einer akuten Gefahr für Passagiere und Besatzung ausgegangen werden. Aufgrund der geringen Dichte von Ammoniak ist damit zu rechnen, dass die Gaswolke nach oben entweicht. Aufgrund der Hygroskopie von Ammoniak wird Wasser durch das Gas absorbiert, sodass Teile des Ammoniaks wieder zu Boden sinken und dort Vegetation und Organismen schädigen [32]. Zum Schutz von Menschen kann es im Falle eines Austritts sinnvoll sein, Am-

Ammoniak ins Wasser einzuleiten. Dort ist es – abhängig von pH-Wert und Temperatur – wasserlöslich und wird teilweise in weniger giftiges Ammonium (NH_4^+) umgewandelt. Ungelöst wirkt Ammoniak zudem sehr toxisch auf Wasserlebewesen [33] und kann zu verringerten Sauerstoffkonzentrationen im Wasser führen [34]. Zusätzlich kann es neben Leckagen im Betrieb bei der Betankung mit Ammoniak zum Austritt kommen, was gerade in bewohnten Gebieten ein erhebliches Gesundheitsrisiko darstellt. Hohe Sicherheitsvorkehrungen sind beim Umgang mit Ammoniak unvermeidbar [24], [35].

Ammoniak ist wie Methanol vollständig wasserlöslich und verteilt sich nach einem Austritt sofort im gesamten Wasserkörper. Schon geringe Konzentrationen wirken toxisch auf aquatische Organismen und stellen auch für die Trinkwasserversorgung ein erhebliches Risiko dar. Zudem ist Ammoniak mit den üblichen Aufbereitungsverfahren nur schwer zu entfernen und kann die Wasserchemie nachhaltig verändern. Im Vergleich zu Methanol, das biologisch schneller abgebaut wird, ist das Risiko für den Bodensee als Trinkwasserreservoir deutlich höher einzustufen. Aus diesen Gründen wird Ammoniak im weiteren Verlauf nicht als Kraftstoffoption betrachtet.

3.1.1.4 HVO

HVO wird aufgrund seiner ähnlichen chemischen Eigenschaften zu Diesel als alternativer Kraftstoff für den Einsatz im Verkehrssektor gehandelt. Der größte Vorteil ist, dass die bereits bestehenden Infrastrukturen für Transport, Speicherung und Verteilung sowie Verbrennungsmotoren ohne Modifikationen direkt für den Einsatz von HVO genutzt werden können. HVO ist somit ein sogenannter Drop-In-Kraftstoff und verbrennt aufgrund seiner hohen Reinheit mit weniger Schadstoffen als konventioneller Diesel. [25], [36]

Hergestellt wird HVO, wie in Abbildung 3-4 dargestellt, durch die Substituierung von Sauerstoff durch Wasserstoff in langkettigen Kohlenwasserstoffen. Diese stammen beispielsweise aus Pflanzenölen oder Rest- und Abfallstoffen wie tierische Fette oder gebrauchte Speiseöle. Unter anderem wurde bis 2021 Palmöl zur Produktion genutzt, was Kritik auf sich zieht aufgrund von Waldrodungen zugunsten von Palmölplantagen. [37]

Für eine klimaneutrale Produktion wird neben den biologischen Grundstoffen auch grüner Wasserstoff benötigt. Für die Herstellung werden pro Tonne Pflanzenöl etwa 35 bis 70 kg Wasserstoff aus Elektrolyse mit erneuerbaren Energien benötigt [37].

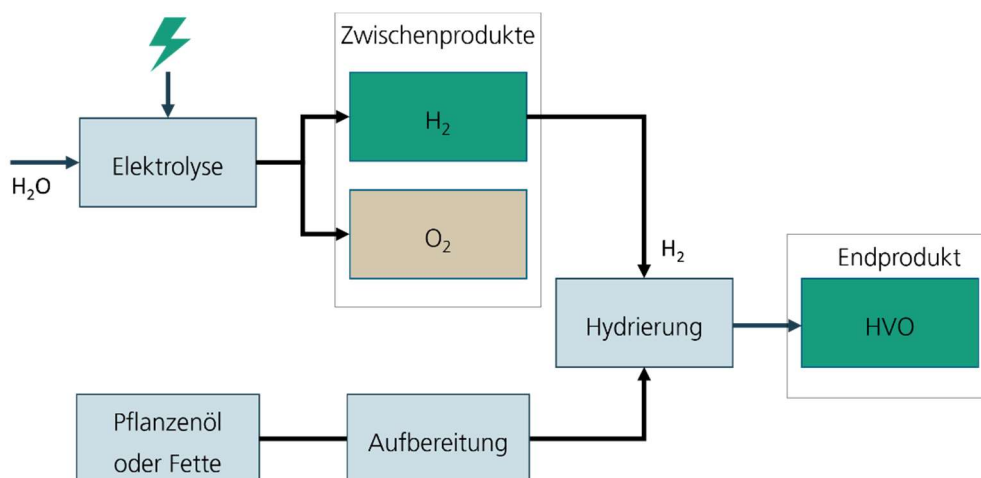


Abbildung 3-4: Herstellung von HVO aus grünem Wasserstoff und biogenen Abfallstoffen

Beim Einsatz von HVO in Verbrennungsmotoren können, je nach Ursprung, die Treibhausgasemissionen gegenüber konventionellen Kraftstoffen deutlich reduziert werden. Dieses Einsparpotenzial hängt an der Wahl geeigneter Ausgangsstoffe für die Herstellung. Im Optimalfall wird HVO aus Altspeiseölen produziert, die andernfalls entsorgt würden. In diesem Fall binden die Pflanzen während ihres Wachstums nahezu die gleiche Menge CO₂, die bei der späteren Verbrennung wieder freigesetzt wird [27]. Durch die Substitution von Diesel mit HVO aus Abfall- und Reststoffen können bis zu 90 % der CO₂-Emissionen reduziert werden [37].

Es besteht die Möglichkeit von Importen. Im Jahr 2023 wurden 90 % der in Deutschland genutzten Kraftstoffe auf Basis von Altspeiseölen importiert [28]. Gleichzeitig ist bei diesen Importen nicht klar, welche Ausgangsstoffe genutzt werden. Es kann zu ökologischen Verlagerungseffekten, Verlust von Biodiversität, Brandrodungen kommen, die indirekte Emissionen bei der Herstellung von HVO darstellen. Unter der Berücksichtigung dieser ist der Vorteil hinsichtlich der Treibhausgasemissionen nichtig. Bei der Verwendung von HVO muss dementsprechend genau darauf geachtet werden unter welchen Bedingungen die Herstellung stattgefunden hat, um die Treibhausgasneutralität zu erzielen. [32,38,40,41]

3.1.2 Verfügbarkeit der Energieträger

3.1.2.1 Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und Methanol

Die globale Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff bildet die Grundlage für die Produktion von Derivaten wie Methanol. Entsprechend sind auch die Kosten dieser Energieträger eng an die Produktionskosten von grünem Wasserstoff gekoppelt.

Im Jahr 2023 lag die weltweite Wasserstoffnachfrage bei 97 Mio. t, ein Anstieg um 2,5 % gegenüber 2022. Der derzeitige Verbrauch konzentriert sich weiterhin auf Raffinerien und die chemische Industrie und wird fast ausschließlich durch Wasserstoff aus fossilen Quellen ohne CO₂-Abscheidung (grauer Wasserstoff) gedeckt. Emissionsarmer Wasserstoff spielt bislang nur eine marginale Rolle mit einer Produktionskapazität von weniger als 1 Mio. t pro Jahr, wenngleich seit 2021 ein Anstieg von rund 50 % zu verzeichnen ist.

Bis 2030 könnten auf Basis angekündigter Projekte jedoch bis zu 49 Mio. t/a an emissionsarmem Wasserstoff verfügbar sein. Die Zahl der Projekte mit finaler Investitionsentscheidung (FID) wächst ebenfalls und summiert sich inzwischen auf eine Produktionskapazität von 3,4 Mio. t/a bis 2030. Davon entfallen rund 1,9 Mio. t/a auf grünen Wasserstoff aus Elektrolyse und 1,5 Mio. t/a auf fossile Quellen unter CO₂-Abscheidung. Damit zeichnet sich ab, dass die Verfügbarkeit insbesondere von grünem Wasserstoff in den kommenden Jahren deutlich zunehmen wird.

Im Mobilitätssektor ist gleichzeitig eine klare Entwicklung hin zur Elektromobilität erkennbar, sodass Wasserstoff voraussichtlich vor allem in Nischenanwendungen sowie im Schwerlastverkehr eingesetzt wird. Für eine sichere regionale Versorgung bleibt der Ausbau erneuerbarer Energiekapazitäten unerlässlich, ergänzt durch internationale Handelsabkommen zum Import von grünem Wasserstoff. [38]

Die Produktion von Methanol stellt einen weiteren Prozessschritt nach der Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung dar. Großanlagen zur Methanolsynthese (mit bereits vorhandenem Wasserstoff und CO₂) erreichen dabei Wirkungsgrade von etwa 75–80 %, wobei zusätzlich der Energieaufwand für Carbon Capture berücksichtigt werden muss. Dies reduziert die Gesamteffizienz der grünen Methanolproduktion weiter und führt zu höheren spezifischen Energiebedarfen im Vergleich zur direkten Nutzung von Wasserstoff. Weltweit existiert momentan nur eine Anlage für die Produktion im industriellen Maßstab [39].

„Abschließend lässt sich festhalten, dass die Verfügbarkeit von grünem Methanol unmittelbar von der Produktion grünen Wasserstoffs sowie von der kosteneffizienten Entwicklung von Carbon-Capture-Technologien, etwa Direct Air Capture, abhängt. Ob die Vorteile von grünem Methanol gegenüber Wasserstoff in Bezug auf Speicherung und Distribution tatsächlich überwiegen, ist derzeit noch offen. Hinsichtlich des Primärenergieeinsatzes sollte zunächst die Verwendung von grünem Wasserstoff gegenüber grünem Methanol priorisiert werden.

3.1.2.2 Verfügbarkeit von HVO

Hinsichtlich der Verfügbarkeit von HVO als Kraftstoffersatz für konventionelle Kraftstoffe liegt die Herausforderung dem Herstellungspotenzial und der verhältnismäßig hohen Kosten zur Gewinnung. HVO wird neben dem Einsatz als Schiffskraftstoff auch im Flugzeugsektor und im Straßenverkehr als vielversprechende Alternative zu Diesel bzw. Kerosin gehandelt. Die Verfügbarkeit von Altspeiseölen reicht nicht für eine Versorgung aller Sektoren aus. Zusätzlich gibt es bereits einen Markt, der sowohl Altspeiseöle als auch tierische Fette verwendet, sodass diese Industrien bei zu hoher Produktion von HVO beschnitten werden und auf klimaschädlicheren Alternativen umsteigen müssen.

Es besteht die Möglichkeit von Importen. Im Jahr 2023 wurden über 90% der in Deutschland genutzten Kraftstoffe auf Basis von Altspeiseölen importiert [28]. Die aktuellen globalen Produktionskapazitäten von HVO liegen bei rund 15 Mio. t pro Jahr. Bereits der alleinige Bedarf an Lkw-Diesel im deutschen Straßenverkehr beläuft sich jedoch auf etwa 14 Mio. t pro Jahr, sodass eine erhebliche Versorgungslücke erkennbar wird. Nach derzeitigen Prognosen (Stand Mai 2025) könnte HVO im deutschen Straßengüterverkehr künftig lediglich 3–13 % des Bedarfs decken – selbst unter der Annahme verdoppelter Importe und einer vollständigen Ausschöpfung der in Deutschland verfügbaren Rohstoffe. Diese Schätzung bezieht sich ausschließlich auf Lkw und Sattelzugmaschinen; für Pkw sowie Schiffs- und Luftverkehr werden bei dieser Betrachtung andere Antriebe und Energieträger angenommen. [37]

Hinzu kommt, dass bei den notwendigen Importen oft unklar ist, welche Ausgangsstoffe für die HVO-Produktion verwendet werden. Dadurch können ökologische Verlagerungseffekte wie der Verlust von Biodiversität oder Brandrodungen entstehen, die indirekt erhebliche Emissionen verursachen. Unter Einbeziehung dieser Effekte relativiert sich der Vorteil von HVO hinsichtlich der Treibhausgasemissionen deutlich. Für eine tatsächliche Treibhausgasneutralität ist daher entscheidend, unter welchen Bedingungen die Herstellung erfolgt. [32,38,40,41]

3.1.3 Kostenschätzung für nachhaltige Energieträger

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieträger werden in Tabelle 3-1 grüner Wasserstoff und Methanol den Referenzen elektrische Energie, Diesel und Benzin gegenübergestellt. Die Tabelle weist die Dichte, die gravimetrische Energiedichte sowie die Kosten pro kg und die daraus abgeleiteten Kosten pro MWh aus.

Tabelle 3-1: Preise ausgewählter Kraftstoffe bezogen auf Gewicht und Energie des Primärenergie-trägers (Stand: Juli 2025)

Kraftstoff	Dichte in kg/m³	grav. Energie- dichte in kWh/kg	Bereitstellungs- preis in €/kg	Kosten in €/MWh _{PE}
Superbenzin	740	12,0	2,26 (1,67 €/l)	188
Diesel	830	11,8	1,95 (1,62 €/l)	165
grüner Wasser- stoff	0,0827 (flüssig: 71)	33,3	13,0 (Dresden)	390
(konv.) Metha- nol*	787	5,60	1,65 ² (1,30 €/l)	295
HVO	780	12,2	2,18 ³ (1,70 €/l)	179
el. Energie (deutscher Ener- giemix)	-	-	-	140

Quelle: [25], ²[40], ³[37];

*Aufgrund von fehlenden Daten bezüglich grünen Methanols oder konventionellen Methanols als Kraftstoff wurde der Preis von Methanol mit einer Reinheit von 99% aus einem Chemikalienhandel als Richtwert verwendet

Es zeigt sich, dass die spezifischen Kosten für grünen Wasserstoff und grünes Methanol derzeit noch deutlich über den Referenzwerten konventioneller Kraftstoffe sowie elektrischer Energie liegen. Zudem ist anzumerken, dass sich die Kosten für grünes Methanol oberhalb des angegebenen Preises für konventionelles Methanol befinden werden. Derzeit ist es jedoch nicht möglich Preise für grünes Methanol anzugeben, da dieses bisher noch nicht kommerziell verfügbar ist. Während Diesel und Benzin preislich weiterhin günstiger bleiben, schlagen bei nachhaltigen Energieträgern insbesondere die Stromgestehungskosten für Elektrolyse sowie zusätzliche Prozessschritte – etwa die CO₂-Gewinnung aus der Luft bzw. punktuellen Quellen und der Energiebedarf für die Fischer-Tropsch-Synthese, bei der Wasserstoff und CO₂ unter hohem Druck unter Anwesenheit von Katalysatoren zu flüssigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt werden – auf die Gesamtkosten durch.

Die in Tabelle 3-1 genannten Referenzpreise für Diesel und Superbenzin stellen den Preis an einer handelsüblichen PKW-Tankstelle dar. Die Steuerbefreiung von der Energiesteuer für Kraftstoffe in der Berufsschifffahrt reduziert den Literpreis von Diesel um 47,04 ct/l und von Superbenzin um 65,45 ct/l [41]. Dies führt zu einer Reduktion der Kosten von Diesel von 165 €/MWh auf etwa 117 €/MWh und von Superbenzin von 188 €/MWh auf etwa 114 €/MWh. Zur Vollständigkeit wird für die spätere in Kapitel 3.4.1 erfolgte Einordnung der betrachteten Antriebssysteme auch eine Steuervergünstigung von 2,05 ct/kWh bei elektrischer Energie berücksichtigt. Dies führt zu einer Reduktion der Primärenergiekosten von Strom von 140 €/MWh auf etwa 120 €/MWh. Die zukünftige Preisentwicklung nachhaltiger Energieträger wird maßgeblich durch zwei gegenläufige Effekte bestimmt. Einerseits ist im Rahmen der europäischen Klimapolitik davon auszugehen, dass die Preise für fossile Kraftstoffe zukünftig weiter ansteigen. Aktuell regelt der nationale Emissionshandel (nEHS) die CO₂-Bepreisung für fossile Brennstoffe im Verkehr in Deutschland. Laut der deutschen Emissionshandels-

stelle liegt der aktuelle Preis bei 55€ pro Tonne CO₂ und soll im Jahr 2026 auf 55-65€ pro Tonne CO₂ ansteigen [42]. Im nEHS ist die gewerbliche Binnenschifffahrt aktuell nicht berücksichtigt, da für diese laut §27 des Energiesteuergesetzes eine Steuerbefreiung vorherrscht. Ab 2027 wird der nEHS durch die Reform des europäischen Emissionshandel abgelöst (EU ETS 2) [43]. Der entscheidende Unterschied ist, dass es im EU ETS 2 keine Festpreise auf die Emissionen geben wird, sondern der Preis sich nach dem Markt aus Angebot und Nachfrage ergibt [44]. Die Produzenten Kohlenstoff-basierter Kraftstoffe müssen im EU ETS 2 CO₂ Zertifikate erwerben, die sie jeweils zum Ausstoß von einer Tonne CO₂ befähigen. Die Mehrkosten werden auf die Endverbrauchenden umgeschlagen. Aktuell ist es nicht vorgesehen, dass die Binnenschifffahrt mit im EU ETS 2 berücksichtigt wird [45]. Allerdings ist im Entwurf des europäischen Emissionshandels ab 2027 eine „Opt-In“-Option vorgesehen [44]. Diese befähigt Mitgliedsstaaten Sektoren nach Prüfung mit in den Emissionshandel aufzunehmen und deren CO₂-Ausstöße mitzubepreisen. Aufgrund des Inkrafttretens des EU ETS 2 ab 2027 und der freien Preisbildung der Zertifikate ist mit einem Anstieg für fossile Kraftstoffe für Endverbraucher zu rechnen. Die exakte Höhe der Preissteigerungen können derzeit nicht vorhergesagt werden.

Andererseits ist bei grünem Wasserstoff ein deutlicher Rückgang der Produktionskosten zu erwarten. Gründe hierfür sind technologische Fortschritte hinsichtlich der Effizienz der Elektrolyse, Skaleneffekte durch zunehmende Serienfertigung von Elektrolyseuren sowie sinkende Kosten für erneuerbare Energien. Die damit einhergehenden Kostensenkungen übertragen sich auch auf grünes Methanol, wobei hier durch die zusätzlichen Prozessschritte der Preisrückgang im Vergleich zu Wasserstoff abgemildert wird. [46]

Insgesamt lässt sich erwarten, dass sich die Kostenrelation zwischen fossilen und nachhaltigen Energieträgern in den kommenden Jahren verschieben wird. Während fossile Energieträger durch die CO₂-Bepreisung teurer werden, nähern sich Wasserstoff und seine Derivate durch sinkende Erzeugungskosten schrittweise einem wettbewerbsfähigen Niveau an.

3.1.4 Emissionsbilanz

Aufgrund der unterschiedlichen Herkunft der alternativen Energieträger ist es sinnvoll neben den physikalischen Eigenschaften auch die Emissionsbilanz zu betrachten. Abbildung 3-5 zeigt für die in dieser Studie ausgewählten Energieträger die CO₂-Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus. Der Sammelbegriff CO_{2eq} dient als Vergleichswert und berücksichtigt neben Kohlenstoffdioxid auch andere Treibhausgasemissionen mit deren entsprechendem Treibhausgaspotential.

Zudem sind in Abbildung 3-5 die Well-to-Tank- (WTT) und die Tank-to-Wake- (TTW) Emissionen im Best- und Worst-Case Szenario aus der Literaturrecherche aufgeführt. Die WTT- Emissionen beinhalten alle Emissionen, die auftreten, um den entsprechenden Kraftstoff zu erzeugen, zu transportieren und im Tank des Fahrzeugs bereitzustellen. Die TTW-Emissionen umfassen den lokalen Ausstoß von Treibhausgasen in der energetischen Verwertung. Als Vergleichskraftstoff dient der fossile marine Kraftstoff Marine-Gas-Oil (MGO). Dieser ähnelt den Eigenschaften von fossilem Diesel und dient in der folgenden Abbildung als Referenz für konventionelle Kraftstoffe.

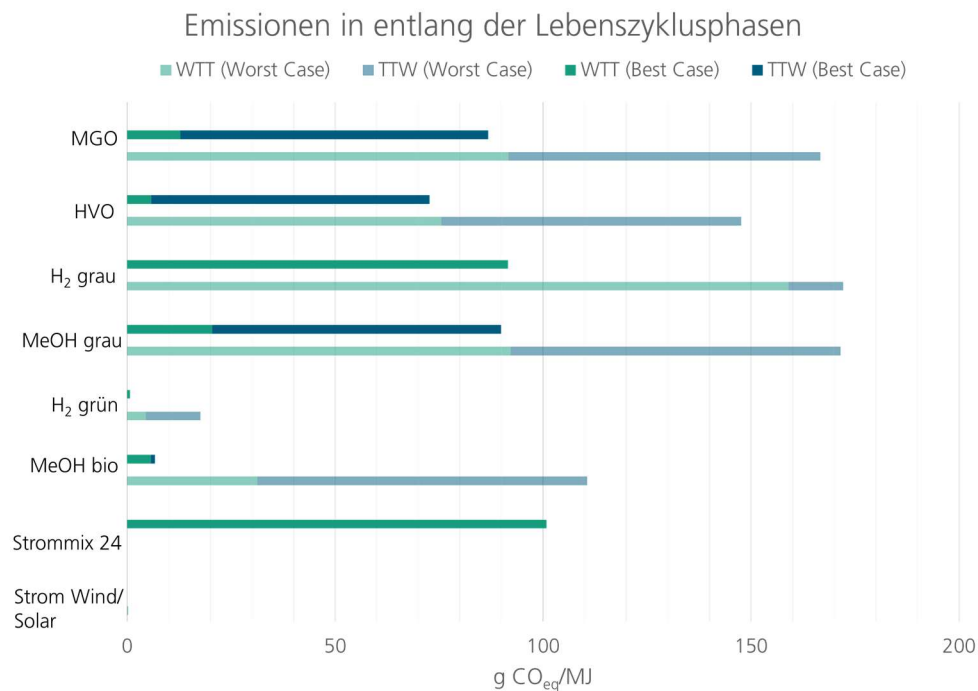


Abbildung 3-5: Emissionen während des Lebenszyklus ausgewählter Kraftstoffe in g CO₂eq/MJ

Aus der Abbildung 3-5 geht hervor, dass der größte Einfluss auf die Emissionsbilanz in der Herstellungsrouteliegt. Methanol und Wasserstoff weisen, wenn sie auf Basis von Erdgas hergestellt werden, kaum Einsparpotentiale im Vergleich zu konventionellen Vergleichskraftstoff auf. Im schlechtesten Fall sind entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit der Herstellung via Erdgas höhere CO₂-Ausstöße zu erwarten als bei dem konventionellen Referenzkraftstoff MGO. Dieser wird in den Well-to-Tank Emissionen zum Teil als Zusatzprodukte in der Dieselraffination bilanziert, weshalb im Best Case-Szenario die Werte für die WTT-Emissionen bei 10 g CO₂eq/MJ liegen. Werden diese Kraftstoffe als eigenständiges Produkt behandelt, liegen die Werte bei über 90 g CO₂eq/MJ. Die exakten Emissionswerte können Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 entnommen werden.

Tabelle 3-2: Emissionswerte ausgewählter Kraftstoffe

Kraftstoff	MGO	HVO	Wasserstoff grau	Methanol grau
WTT (Best Case)	12,8	5,8	91,58	20,4
WTT (Worst Case)	91,67	75,5	159	92,2
TTW (Best Case)	74,08	66,9	0	69,49
TTW (Worst Case)	75	72,5	13,1	79,3

Tabelle 3-3: Fortsetzung – Emissionswerte ausgewählter Kraftstoffe und elektrischer Energie

Kraftstoff	Wasserstoff grün	(Bio-) Methanol	Strommix 2024 ³	Strom aus Wind/Solar ²
WTT (Best Case)	0,71	5,8	100,83	0
WTT (Worst Case)	4,5	31,3	-	0,27*
TTW (Best Case)	0	0,9	0	0
TTW (Worst Case)	13,1	79,3	0	0

Quellen sofern nicht anders gekennzeichnet: [47], [48], [49]; ¹ [50], [51]; ³ [52]; ⁴ [53]

* Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs für Peripherie aus dem deutschen Strommix

Im Gegensatz zu den grauen Herstellungsrouten zeigen hinsichtlich der Emissionen die grünen Alternativen Methanol und Wasserstoff erhebliche Einsparpotentiale. Wasserstoff kann im Idealfall komplett emissionsfrei hergestellt und energetisch verwertet werden. Bei Bio-Methanol sind die dargestellten Emissionen mit der Fermentation der Biomasse verbunden. Es ist auch möglich, wie in Kapitel 3.1.2 erläutert, Methanol durch die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre und grünen Wasserstoff herzustellen. Dadurch wären die Emissionen in der Herstellung bilanziell klimaneutral. Bei Methanol und Wasserstoff resultieren die Unterschiede in den TTW-Emissionen aus den unterschiedlichen Möglichkeiten der Energiewandlung. Die geringsten Emissionen sind mit der Energiewandlung durch Brennstoffzellen zu erwarten, während die höheren Werte aus der Verbrennung resultieren. Hier können Abgasnachbehandlungen eingesetzt werden, um lokale Emissionen weiter zu reduzieren. Wie bereits in Kapitel 3.1.2.2 beschrieben, ist die Herkunft der für HVO eingesetzten Ausgangsstoffe entscheidend für dessen Klimabilanz. Abbildung 3-5 zeigt, dass die Lebenszyklusemissionen, die von dem konventionellen Referenzkraftstoff MGO übersteigen können. Das begründet sich in den möglichen Verlagerungseffekten und den damit verbunden Emissionen, die in direktem Zusammenhang mit der Produktion von HVO stehen. Das Best-Case-Szenario in Abbildung 3-5 geht für HVO davon aus, dass der eingesetzte Wasserstoff grün ist, der biogene Rohstoff aus Altöl besteht und die Produktion lokal, ohne Importe stattfindet.

3.1.5 Qualitative Bewertung ausgewählter Energieträger

Die zuvor durchgeführte Analyse der untersuchten Kraftstoffe verdeutlicht deutliche Unterschiede in Bezug auf Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Emissionsbilanz sowie Toxizität. Grüner Wasserstoff überzeugt durch eine sehr gute Ökobilanz und geringe Toxizität, weist jedoch eine nur eingeschränkte Verfügbarkeit und erhebliche Herausforderungen bei Transport und Speicherung auf. Grünes Methanol bietet Vorteile bei Lagerung und Distribution und zeigt im Vergleich eine günstigere Handhabbarkeit, ist jedoch durch höhere Produktionskosten, eine geringere ökologische Gesamtbilanz sowie seine Toxizität limitiert. HVO ist aktuell der wirtschaftlichste Energieträger und technisch ohne Aufwand integrierbar, erreicht aber nicht die Emissionseinsparung von Wasserstoff und ist zudem stark von einer begrenzten Rohstoffbasis abhängig. Ammoniak wurde, wie zuvor erläutert, aufgrund seiner hohen Toxizität und der besonderen Risiken für den Bodensee als Trinkwasserreservoir von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Folgende Tabelle 3-4 zeigt den qualitativen Vergleich der zuvor analysierten grünen Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als nachhaltigen Kraftstoff für die Bodenseeschifffahrt.

Tabelle 3-4: Qualitative Bewertung ausgewählter Kraftstoffe

Bewertungskriterium	grüner Wasserstoff	grünes Methanol	HVO
Verfügbarkeit Kraftstoff	0	-	--
Wirtschaftlichkeit Kraftstoff	-	--	+
Lebenszyklus-Emissionen	++	+	-
Toxizität und Umweltauswirkung	++	-	0
Fazit	+++	---	--

Die qualitative Bewertung berücksichtigt sowohl die aktuellen Rahmenbedingungen als auch die erwartete Entwicklung von Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit in naher Zukunft. Durch die zuvor geschilderten Annahmen ist davon auszugehen, dass diese Kriterien in erheblichem Maße beeinflusst werden. Bei den Lebenszyklus-Emissionen sowie bei Toxizität und Umweltauswirkungen der Energieträger sind hingegen keine wesentlichen Veränderungen gegenüber dem aktuellen Stand zu erwarten.

3.2 Alternative Antriebstechnologien

Die Nutzung der in Energieträgern gespeicherten Energie erfordert den Einsatz geeigneter Energiewandler. Dabei wird die chemische Energie so umgewandelt, dass sie als mechanische oder elektrische Leistung dem Propeller zugeführt werden kann und somit den Schiffsantrieb gewährleistet. Ausgehend von den zuvor dargestellten Kraftstoffen lassen sich unterschiedliche Antriebskonzepte ableiten, die zur energetischen Bewertung in der Bodenseeschifffahrt in Frage kommen.

Zunächst werden die verschiedenen Antriebssysteme, ihre wesentlichen Komponenten sowie die daraus resultierende Tank-to-Propeller-Effizienz (TTP) analysiert. Anschließend erfolgt eine Betrachtung der erforderlichen Speichersysteme, einschließlich ihres Platz- und Gewichtsbedarfs, um diese im Gesamtkontext der Antriebskonzepte einzuordnen. Abschließend werden spezifische Richtpreise für die einzelnen Systeme vorgestellt.

3.2.1 Antriebssysteme

Hinsichtlich der Leistungsklasse sowie benötigter Reichweite, können die möglichen Antriebssysteme im Wesentlichen auf vier Technologien eingegrenzt werden: der Verbrennungsmotor zur Nutzung von flüssigen Kraftstoffen, die Hybridsysteme aus Verbrennungsmotor und Batterie als Pufferspeicher, die Brennstoffzelle mit Batterie sowie der vollelektrische Antrieb.

3.2.1.1 Verbrennungsmotor

Die bisher am meisten genutzte Technologie ist der Verbrennungsmotor. Abbildung 3-6 zeigt ein Antriebssystem auf Basis eines Verbrennungsmotors. Dieser erzeugt zum einen die mechanische Energie für den Schiffsantrieb und zum anderen in Verbindung

...mit dem Generator elektrische Energie für die Versorgung von Nebenverbrauchern an Bord. Zwischen Verbrennungsmotor und Propeller ist ein Getriebe zwischengeschaltet, um unterschiedliche Übersetzung zu realisieren. Der Wirkungsgrad für den reinen Antriebsstrang ohne Generator liegt zwischen 19,6% und 44,1% von Tank zum Propeller.

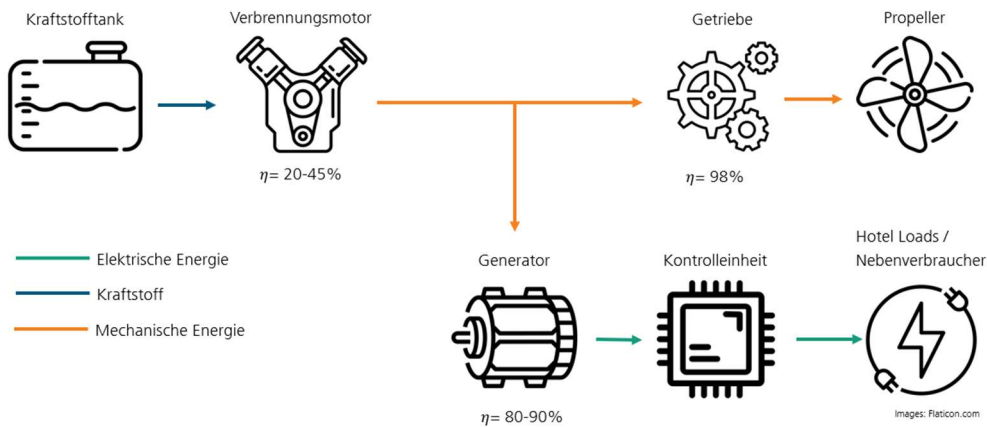


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Verbrennungsmotor; eigene Darstellung nach [54]; Wirkungsgrad aus [24], [54], [55]

Als Kraftstoff für diese Antriebstechnologie eignet sich zum einen HVO. Da dieser, wie zuvor erläutert, als Drop-In-Fuel genutzt werden kann, müssen für HVO kaum bis keine zusätzlichen Anpassungen an bereits bestehenden Diesel-Motoren durchgeführt werden [27]. Neben HVO kann Methanol im Verbrennungsmotor genutzt werden [56], [57]. Hier ist mit Anpassungen an bereits bestehende Motoren zu rechnen. So müssen aufgrund der geringeren Energiedichte von Methanol unter anderem Injektoren und Pumpen für größere Mengen Kraftstoff angepasst werden. Zudem bestehen Unterschiede in der Materialkompatibilität sowie dem Zündverhalten im Vergleich zu Diesel oder Benzin. Es sind bereits erste Motoren erhältlich, die explizit für die Verbrennung von Methanol entwickelt wurden. [56], [57] Die Kosten für eine Umrüstung von einem 2-Takt-Dieselmotor auf Methanol betragen nach IMO etwa 250-350 €/kW bis zu 650 €/kW im Bereich maritimer Schifffahrt [58]. Andere Quellen gehen davon aus, dass eine Umrüstung etwa 25% der Kosten deren eines Neubaus entspricht [59]. Für die Binnen- und Seeschifffahrt sind derzeit keine Werte zu finden.

Grundsätzlich kann auch Wasserstoff in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Hinsichtlich der hohen Kosten für Wasserstoff und die konfigurierten Verbrennungsmotoren sowie Speicher- und Sicherheitssysteme ist nach aktuellem Stand die Brennstoffzelle aufgrund ihrer höheren Effizienz für die Nutzung von reinem Wasserstoff zu bevorzugen.

3.2.1.2 Hybride Antriebssysteme

Hybride Antriebssysteme kombinieren mehrere Energiequellen, um Effizienz, Flexibilität und Betriebssicherheit zu erhöhen. Durch die Kopplung eines Primärenergiewandlers mit einem Batteriespeicher können Lastspitzen abgefangen, Teillastbetrieb optimiert und die Gesamteffizienz erhöht werden.

Hybridelektrischer Antrieb mit Verbrennungsmotor und Akkumulator

Zunehmend setzen neuere Schiffe auf einen diesel-elektrischen Antrieb. Dabei wird die Verbrennungsmaschine mit einem Generator gekoppelt, sodass der Motor bei konstanter Drehzahl am Auslegungspunkt betrieben werden kann und die Effizienzverluste im Teillastbereich reduziert werden. Abbildung 3-7 zeigt schematisch ein hybridelektri-

...ches System, bestehend aus Verbrennungsmotor mit Generator, Batteriespeicher und Elektromotor. Die im Verbrennungsmotor freigesetzte chemische Energie wird zunächst in mechanische, anschließend im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Über eine zentrale Kontrolleinheit wird diese Energie entweder direkt dem Antriebsstrang zugeführt oder im Batteriespeicher zwischengespeichert. Auf diese Weise können Lastspitzen durch Entladung der Batterie abgefangen werden. Der Vortrieb des Schiffes erfolgt stets über den Elektromotor gekoppelt an den Propeller.

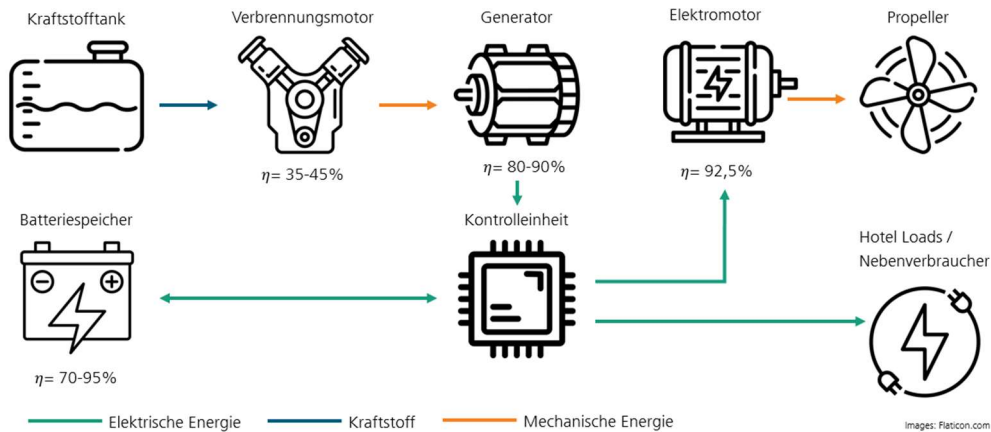


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Hybridelektrisch mit Verbrennungsmotor und Akkumulator; eigene Darstellung nach [35]; Wirkungsgrad aus [11], [35], [36]

Das hybridelektrische System hat in Tests gezeigt, dass es sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile bietet. Grundlage ist der Betrieb des Verbrennungsmotors nahe des optimalen Arbeitspunkts, wodurch Kraftstoffverbrauch, Kosten und Emissionen reduziert werden. Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt werden durch den Batteriespeicher ausgeglichen. Bei der Wirkungsgradberechnung kann daher angenommen werden, dass Motor und Generator mit maximaler Effizienz betrieben werden. Der resultierende Systemwirkungsgrad liegt zwischen 25,9% und 37,5%. [36] Das Erreichen von Klimaneutralität ist in dieser Kombination aufgrund des Verbrennungsprozesses nur bedingt möglich. Werden analog zu Verbrennungsmotoren HVO oder grünes Methanol verwendet, so kann jedoch kurzfristig eine deutliche Emissionsreduktion von bis zu 25% erzielt werden [60].

Hybridelektrischer Antrieb mit Brennstoffzelle und Akkumulator

Eine vielversprechende und in diversen Pilotprojekten – wie beispielsweise Nemo H2, SF-BREEZE, ELEKTRA – verwendete Antriebstechnologie ist ein hybridelektrischer Antrieb bestehend aus Brennstoffzelle und Akkumulator. Abbildung 3-8 zeigt ein Schema eines parallelen hybrid-elektrischen Antriebssystems auf Basis einer Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle und einem Batteriespeicher. Die Brennstoffzelle erzeugt durch die chemische Reaktion von Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrische Energie. Diese wird nach Bedarf dem Antriebsstrang direkt zugeführt oder in dem Batteriespeicher zwischengespeichert.

Im maritimen Bereich wird vor allem die Niedertemperatur Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzelle (NT-PEMFC) betrachtet, da diese im Vergleich zu anderen Brennstoffzellentypen eine niedrige Betriebstemperatur und eine höhere Lastflexibilität aufweist [61]. Dennoch benötigt ein Brennstoffzellensystem zur Aufnahme kurzfristiger Lastwechsel und dem Erhöhen der Gesamteffizienz einen Akkumulator als Pufferspeicher. Neben der NT-PEMFC werden für die maritime Schifffahrt in großen Leistungsklassen sowohl Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) und Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) in Betracht gezogen, da diese im Vergleich zur NT-PEM-Brennstoffzelle niedrigere Anfor-

...derungen an die Reinheit des Brennstoffs (Wasserstoff) haben, oder mit Methanol oder Ammoniak direkt betrieben werden könnten [37]. Für die Bodenseeschifffahrt sind jedoch DMFC und SOFC derzeit von geringer Relevanz, da ihre Stärken in erster Linie im stationären Betrieb oder als Kombikraftwerk liegen, wobei die hohen Betriebstemperaturen als nutzbare Abwärme integriert werden können. Auf Schiffen hingegen stellen die hohen Temperatur-niveaus erhebliche Anforderungen an Materialien, Sicherheit und Lastwechselverhalten dar, sodass sie im Vergleich zu NT-PEMFC deutlich eingeschränkt sind.

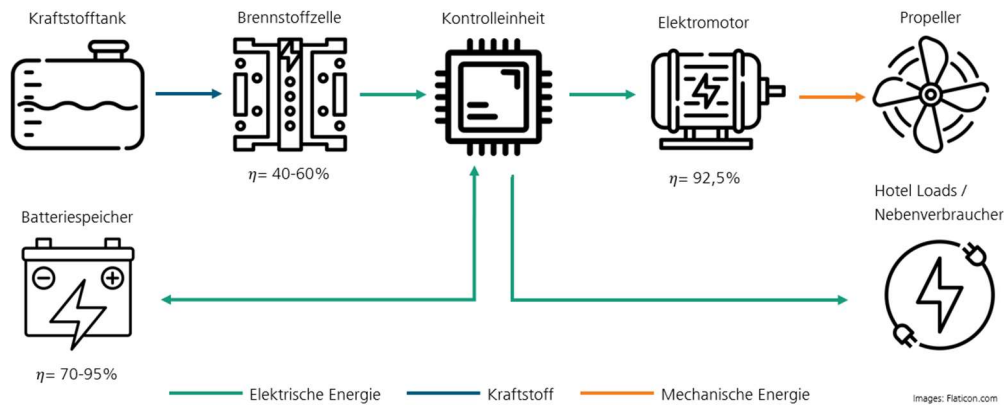


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Hybridelektrisch mit Brennstoffzelle und Akkumulator; eigene Darstellung nach [35]; Wirkungsgrad aus [11], [35], [36]

Im Vergleich zum Verbrennungsmotor weist die Brennstoffzelle einen deutlich höheren Wirkungsgrad bei der Energiewandlung auf. Der Wirkungsgrad des hybriden Gesamtsystems aus Brennstoffzelle und Batteriespeicher nach Abbildung 3-8 liegt zwischen 31,5 % und 53,8 %. Dieser kann je nach Zusammenspiel aus Brennstoffzelle und Akkumulator weiter erhöht werden. Dies verdeutlicht, dass durch die Kombination beider Komponenten sowohl eine höhere Energieeffizienz als auch eine flexiblere Lastabdeckung erzielt werden kann. Der maßgebliche Vorteil bei diesem System liegt darin, dass im Betrieb mit grünem Wasserstoff ausschließlich reines Wasser entsteht und dadurch eine komplette Emissionsfreiheit besteht.

Die Entwicklung und Optimierung von NT-PEMFC-basierten Antriebssystemen wurde seit dem Jahr 2000 bereits in mehr als 50 Schiffen (Stand: November 2024) vorangetrieben [62].

3.2.1.3 Voll-elektrisches Antriebssystem

Abschließend ist in Abbildung 3-9 das vollelektrische Antriebssystem dargestellt. Abgesehen vom reinen Verbrennungsmotor übernimmt der Batteriespeicher in allen betrachteten Antriebskonzepten eine zentrale Funktion. Im vollelektrischen System stellt er die alleinige Energiequelle dar. Die im Akkumulator chemisch gebundene Energie wird über Leistungselektronik bei der Entladung in elektrische Energie umgewandelt und dem Elektromotor zugeführt, der den Propeller antreibt. Damit wird der gesamte Schiffsantrieb ausschließlich durch elektrische Energie realisiert, wobei die Reichweite und Einsatzdauer unmittelbar von der verfügbaren Speicherkapazität abhängen.

Für den Einsatz vollelektrischer Antriebe ist die Verfügbarkeit ausreichender Ladezeiten im Hafen ein entscheidender Faktor. Im Fall der Bodenseeschifffahrt ist davon auszugehen, dass die Liegezeiten der meisten Schiffe ausreichen, um den erforderlichen Ladeprozess vollständig abzuschließen. Schnellladestationen nach dem Stand der Technik weisen moderne Ladeinfrastrukturen für PKW bereits eine Ladeleistungen von etwa

50 kW bis 400 kW auf, sodass eine Vollladung während eines typischen Hafenaufenthalts realisierbar ist. Hierzu wird in 3.3.1 genauer eingegangen.

Um die angestrebte Emissionsfreiheit im Betrieb tatsächlich zu gewährleisten, sollte die Stromversorgung aus erneuerbaren Energien erfolgen. Ergänzend können Photovoltaikmodule an Bord installiert werden, die zwar nur in begrenztem Umfang Energie für den Antrieb bereitstellen, jedoch dazu beitragen können, Selbstentladung zu kompensieren und den Gesamtwirkungsgrad des Systems zu erhöhen.

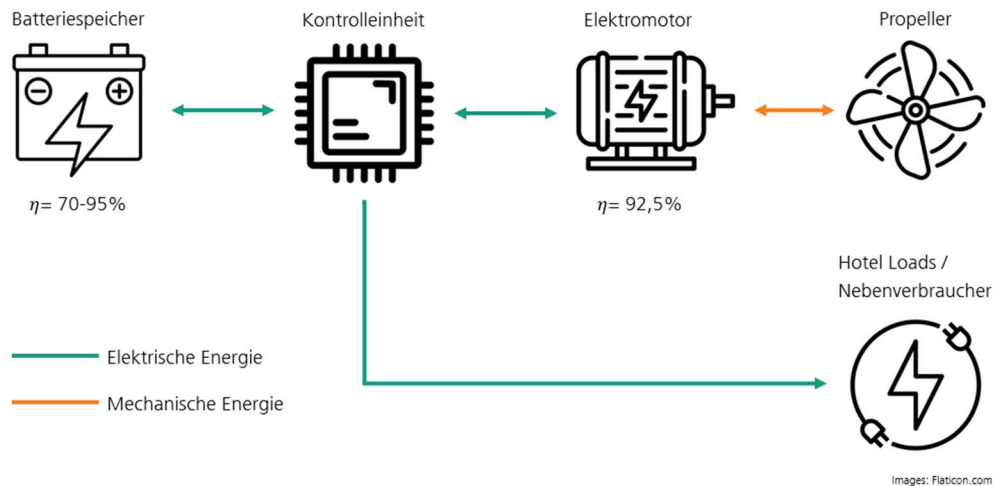


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung Antriebstechnologie – Voll-elektrisch; eigene Darstellung nach [35]; Wirkungsgrad aus [11], [35], [36]

Im Vergleich zu den anderen Antriebstechnologien ist bei dem voll-elektrischen System ein hoher Wirkungsgrad zu erwarten. Dieser liegt unter Einbeziehen der Ladeverluste zwischen 65 % und 83 %.

3.2.2 Speichertechnologien und Bereitstellung

Die Speicherung und Bereitstellung alternativer Energieträger an Bord stellt insbesondere hinsichtlich der Energiedichte eine zentrale technische Herausforderung dar. Für die Bewertung der unterschiedlichen Optionen sind mehrere physikalische Kenngrößen maßgeblich.

Die gravimetrische Energiedichte, wie auch bereits in Kapitel 3.1.1 erläutert, beschreibt den Energiegehalt pro Masseinheit und liefert eine Aussage über die erforderliche Kraftstoffmenge zur Erreichung einer bestimmten Reichweite. In Kombination mit der Stoffdichte bei 15 °C lässt sich daraus die volumetrische Energiedichte im druckfreien Zustand berechnen, die wiederum den Energiegehalt pro Volumeneinheit bestimmt und somit Rückschlüsse auf den notwendigen Tankraum ermöglicht. Dies spielt hinsichtlich Wasserstoffs sowie Methanol die derzeit größte technische Herausforderung dar, um bei ähnlichen Platzbedarfen der Kraftstofftanks vergleichbare Reichweiten zu erreichen. Ergänzend ist der Siedepunkt von Bedeutung, da er vorgibt, unter welchen thermischen und drucktechnischen Bedingungen ein Energieträger gefahrlos gespeichert werden kann. Schließlich spielen die Zündgrenzen, insbesondere hinsichtlich Leckagen, eine wichtige Rolle für den sicheren Betrieb, da sie den Konzentrationsbereich definieren, in dem sich mit Luft ein zündfähiges Gemisch ausbildet. Diese Kenngrößen bilden die Grundlage für die Auswahl und Auslegung geeigneter Speichersysteme und sind somit entscheidend für die technische Machbarkeit und Sicherheit klimaneutraler Antriebskonzepte. In Tabelle 3-5 sind die grundlegenden Kennwerte aufgeführt.

Tabelle 3-5: Zentrale Kennwerte ausgewählter Energieträger und Speichertechnologien

Kraftstoff/ Energieträger	Gravimetrische Energiedichte [kWh/kg]	Dichte bei 15°C [kg/m³]	Siedepunkt [°C]	Zündgrenzen in Luft [vol.%]
Superbenzin	12,0	720-775*	35-210	0,6-8
Diesel	11,5	820-845*	150-390	0,6-9,5
Wasserstoff¹	33,3	0,09* 42 (700 bar) 71 (flüssig)	-253	4,0-75,0
Methanol	5,6	792*	65	6,7-36
HVO	12,2	775-785*	180-320	-
Li-Batterien²	0,11-0,19	-	-	-

Quelle: [32], [63]; ¹[64]; ²[65]

* Normbedingungen: 15°C und Umgebungsdruck

Aus Tabelle 3-5 wird deutlich, dass sich die betrachteten Energieträger (exklusive HVO) erheblich von konventionellen Kraftstoffen wie Diesel oder Benzin unterscheiden. Wasserstoff weist mit 33,3 kWh/kg zwar die höchste gravimetrische Energiedichte auf, besitzt jedoch aufgrund seiner geringen Dichte bei Normalbedingungen (0,09 kg/m³) eine sehr niedrige volumetrische Energiedichte. Im Vergleich dazu liegen Diesel und Benzin mit etwa 11–12 kWh/kg gravimetrisch deutlich niedriger, sind aufgrund ihrer hohen Dichte aber volumetrisch wesentlich besser nutzbar. Um Wasserstoff speicherbar zu machen, ist daher eine Verflüssigung bei –253 °C oder eine Kompression auf 350 bar oder 700 bar notwendig, was jeweils mit zusätzlichem Energie- und Technikaufwand verbunden ist und dadurch die Gesamteffizienz des Antriebs in Bezug auf die Primärenergie weiter reduziert. Hinzu kommt die breite Zündgrenze von 4–75 Vol.-%, die hohen Anforderungen an Sicherheitskonzepte stellt.

In der Schifffahrt wird Wasserstoff derzeit überwiegend als komprimiertes Gas (CH₂) gespeichert, da diese Technologie technisch ausgereift, relativ kosteneffizient und in der Handhabung erprobt ist. Für die Speicherung sind große Tankvolumina und erhebliche Gewichtsanteile erforderlich, was die Nutzlast und Reichweite von Schiffen einschränkt. Die Betankung erfordert zudem eine aufwendige Infrastruktur mit Kompressoren, Kühlsystemen und Druckregelventilen und ist im Vergleich zum Dieselmotoren zeitintensiver. Containerisierte, austauschbare Speicher stellen eine mögliche Lösung für kleinere Schiffe dar. Die Speicherung von Wasserstoff in verflüssigter Form (LH₂) ermöglicht mit etwa 71 kg/m³ eine deutlich höhere volumetrische Energiedichte als komprimierter Wasserstoff und damit größere Reichweiten. Die Verflüssigung erfordert jedoch einen hohen Energieaufwand (ca. 12 kWh/kg H₂) und die Lagerung bei –253 °C stellt hohe Anforderungen an Kryotanks, Isolierung und Sicherheitssysteme. Zusätzlich ist die Verfügbarkeit von LH₂ bislang begrenzt und es fehlt eine flächendeckende Bunkerinfrastruktur, wodurch der Einsatz im schifffahrtlichen Kontext aktuell nur in Pilotprojekten erprobt wird. [66]

Methanol besitzt mit 5,6 kWh/kg nur etwa die Hälfte der gravimetrischen Energiedichte von Diesel oder Benzin, ist jedoch bei Normalbedingungen flüssig und damit handhabungsseitig einfacher zu integrieren als Wasserstoff. Der Siedepunkt von 65 °C erleichtert die Lagerung, allerdings wirken die breite Zündgrenze (6,7–36 Vol.-%) und die Materialkorrosivität einschränkend. Tanks und Leitungen müssen aus speziellen Materialien bestehen und mit zusätzlichen Sicherheitssystemen ausgerüstet werden.

HVO weist mit rund 12,2 kWh/kg eine nahezu identische gravimetrische Energiedichte wie Diesel oder Benzin auf. Auch die Dichte bei 15 °C liegt mit 775–785 kg/m³ in einem vergleichbaren Bereich. Der Siedepunkt zwischen 180 und 320 °C erlaubt eine sichere Lagerung und Handhabung ohne kryogene oder hochdrucktechnische Maßnahmen. Zudem treten keine relevanten Zündgrenzen im üblichen Betriebsbereich auf, sodass HVO in bestehenden Infrastrukturen und Motoren weitgehend ohne Anpassungen genutzt werden kann. Damit kommt HVO den Eigenschaften konventioneller Kraftstoffe am nächsten, ist jedoch in seiner Verfügbarkeit stark limitiert.

Lithium-Ionen-Batterien stellen schließlich eine grundlegend andere Speicherform dar. Ihre gravimetrische Energiedichte liegt mit rund 0,54–1,0 kWh/kg weit unterhalb flüssiger Kraftstoffe, was zu deutlich höherem Gewicht führt. Hinsichtlich der volumetrischen Energiedichte von Batteriesystemen sind derzeit Werte von bis zu 800 kWh/m³ möglich [67]. Im Vergleich zu Diesel und Benzin stellt die Reichweite pro Gewichtseinheit daher bei Akkumulatoren die größte Herausforderung dar. Es ist jedoch anzumerken, dass durch intensive Entwicklung an Batteriesystemen in den letzten Jahren kontinuierlich Fortschritte in Energiedichte erzielt wurden. Zusätzliche Vorteile ergeben sich aus der einfachen Integration an Bord, der höheren Effizienz im Antriebsstrang, der zunehmend sinkenden Kosten sowie der Möglichkeit der lokalen Emissionsfreiheit.

Im direkten Vergleich mit Diesel und Benzin, die mit einer gravimetrischen Energiedichte von etwa 11–12 kWh/kg und einer volumetrischen Energiedichte von rund 9.500–10.500 kWh/m³ den Referenzrahmen bilden, schneiden die Betrachteten Energieträger mit den zugehörigen Speichersystemen deutlich unterschiedlich ab. In Tabelle 3-6 sind die spezifischen gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten der betrachteten Energieträger zusammengefasst. HVO erreicht mit 12,2 kWh/kg und ca. 9.400 kWh/m³ nahezu identische Werte und erzielt bei gleichen Tankvolumina etwa dieselbe Reichweite wie mit konventionellen Kraftstoffen. Methanol liegt gravimetrisch mit 5,6 kWh/kg bei etwa der Hälfte fossiler Kraftstoffe; durch die ähnliche Dichte (ca. 790 kg/m³) ergibt sich eine volumetrische Energiedichte von rund 4.500 kWh/m³, also weniger als die Hälfte von Diesel oder Benzin. Wasserstoff besitzt gravimetrisch mit 33,3 kWh/kg den höchsten Wert aller betrachteten Energieträger. Bei 700 bar Druckspeicherung beträgt die volumetrische Energiedichte jedoch nur etwa 1.400 kWh/m³, was lediglich einem Siebtel der fossilen Referenzwerte entspricht. Flüssiger Wasserstoff verbessert diesen Wert auf etwa 2.350 kWh/m³, bleibt aber ebenfalls deutlich unter Diesel und Benzin. Lithium-Ionen-Batterien schließlich weisen mit 0,11–0,19 kWh/kg gravimetrisch und bis zu 375 kWh/m³ volumetrisch eine sehr geringe Energiedichte auf. Dies bedeutet einen deutlich höheren Masse- und Platzbedarf an Bord, bietet jedoch den Vorteil einer emissionsfreien direkten Strombereitstellung mit dem höchsten Wirkungsgrad in Bezug auf die eingesetzte Primärenergie.

Tabelle 3-6: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte ausgewählter Energieträger und Speichertechnologien

Kraftstoff/ Energieträger	Benzin/ Diesel	H2	MeOH	HVO	Li-Akku
Gravimetrische Energiedichte [kWh/kg]	11-12	33	5,6	12,2	0,11-0,19
Volumetrische Energiedichte [kWh/m³]	9.500 - 10.500	1.400 2.350 (flüssig)	4.500	9.400	190-375

Aus Hirscher 2010 werden zudem die Platz- und Gewichtsbedarfe für das Speichersystem mit betrachtet [68]. Abbildung 3-10 zeigt die volumetrischen und gravimetrischen

Energiedichten der ausgewählten Speichersysteme – exklusive MeOH, da hierzu nach aktuellem Stand keine Daten zu finden waren – und veranschaulicht im Vergleich zu Wasserstoff und Akkumulatoren deutlich die unterschiedliche Energiedichte und somit den geringeren Platz- und Gewichtsbedarf von Benzin.

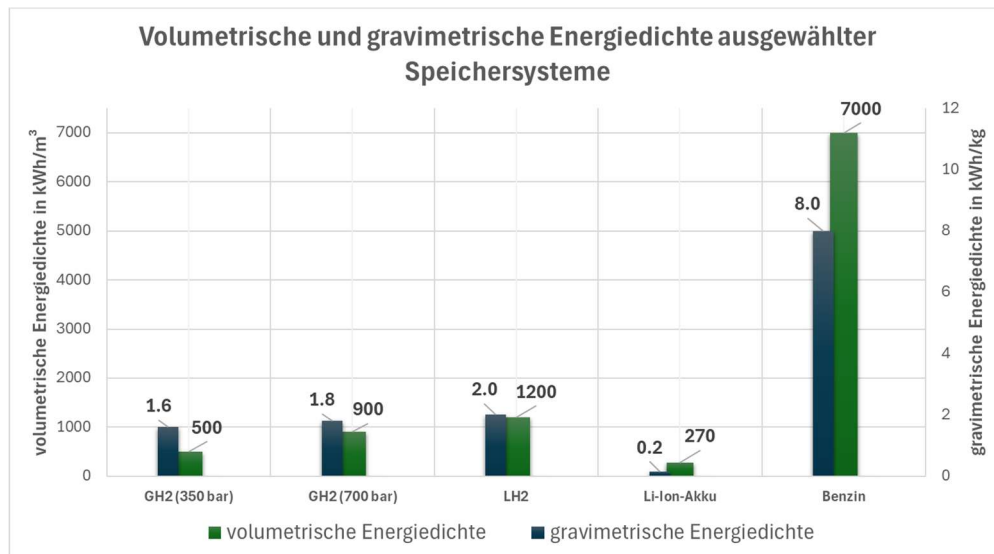


Abbildung 3-10: Vergleichende Darstellung der gravimetrischen und volumetrischen System-Energiedichten ausgewählter Speichersysteme nach [68]

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass Diesel und Benzin weiterhin die günstigsten Eigenschaften in Bezug auf volumetrische Energiedichte und Handhabbarkeit aufweisen, während Wasserstoff und Methanol aufgrund technischer Herausforderungen zusätzliche Sicherheits- und Infrastrukturmaßnahmen erfordern. Batterien sind sicherheitstechnisch vorteilhaft, bleiben aber aufgrund ihrer niedrigen Energiedichte auf Kurzstrecken-anwendungen beschränkt.

3.2.3 Investitionskosten für Antriebs- und Speichersysteme

Die Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) als prozentualer Anteil der CAPEX von Antriebs- und Speichersystemen unterscheiden sich je nach Technologie deutlich. zeigt einen Überblick der CAPEX und OPEX der betrachteten Technologien. Bei den Energiewandlern liegen konventionelle Verbrennungsmotoren für Diesel/HVO mit 240–460 €/kW und für Methanol-Ottomotoren mit 265–505 €/kW im unteren Bereich. Elektromotoren, die für alle betrachteten hybrid- und voll-elektrischen Antriebssysteme benötigt werden, bewegen sich mit 150–600 €/kW größtenteils darunter, während PEM-Brennstoffzellen mit 730–1.100 €/kW derzeit die teuerste Technologie darstellen. Diese hohen Kosten resultieren insbesondere aus den aufwendigen Herstellungsprozessen für die Membran-Elektroden-Einheiten, dem Einsatz von Edelmetallkatalysatoren sowie dem noch geringen Produktionsvolumen.

Auch bei den Speichersystemen zeigen sich deutliche Unterschiede: Flüssige Kraftstoffe wie HVO oder Methanol verursachen nur sehr geringe Tankkosten von 0,08–0,14 €/kWh, während Wasserstoffspeicher aufgrund hoher technischer Anforderungen bezüglich der Diffusionsfähigkeit des Moleküls erheblich teurer sind. Drucktanks (< 700 bar) liegen bei etwa 95 €/kWh. Der hohe Preis ist auf die komplexe Konstruktion der Hochdruck- oder auch Kryotanks zurückzuführen, die speziellen Materialien, Sicherheitssysteme und aufwendige Isolierung erfordern. Akkumulatoren sind mit 170–600 €/kWh ebenfalls kostenintensiv, bieten jedoch den Vorteil einer direkten Energiebereitstellung mit nur wenigen Umwandlungs- und Speicherverlusten. Es ist anzumerken, dass die Kostenschätzungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Herstel-

ler, Qualität, Lebensdauer, Produktionsort, Systemgröße und weitere Faktoren wirken sich dabei in einem nicht zu vernachlässigen Maße auf die hier angenommenen CAPEX aus.

Langfristig ist davon auszugehen, dass sich die Kostenstrukturen verschieben. Sowohl bei PEM-Brennstoffzellen und Wasserstofftanks als auch bei Batteriesystemen wird mit deutlichen Kostensenkungen gerechnet. Gründe hierfür sind der erwartete Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft und den damit verbundenen Skaleneffekten durch steigende Produktionszahlen (Economy-of-Scale), technologische Weiterentwicklungen bei Materialien und Fertigungsprozessen sowie eine zunehmende Standardisierung. Insbesondere der Ausbau der Wasserstoff- und Batteriewirtschaft dürfte die Investitionskosten in den kommenden Jahren signifikant reduzieren, wodurch diese Technologien mittel- bis langfristig auch im maritimen Bereich wettbewerbsfähiger werden.

Tabelle 3-7: Spezifische Investitions- und Operationskosten ausgewählter Energiewandler und Speichersysteme

Energiewandler	CAPEX in €/kW^{1,2}	OPEX in %CAPEX/a²
ICE-Diesel/HVO	240/460*	2,5
ICE-Methanol	265/505*	2,5
PEMFC-System	730-1100	6
Elektromotor	150-600 ⁶	1
Speichersystem	CAPEX in €/kWh^{1,2}	OPEX in %CAPEX/a²
Tank Diesel/HVO	0,08-0,09	2
Tank Methanol	0,14 ³	2
Tank Wasserstoff (350-700 bar)	95 ⁴	-
Akkumulator	170-600 ⁵	1

* 4-Takt-Motor / 2-Takt-Motor;

¹ [69]; ² [54]; ³ [70]; ⁴ [71]; ⁵ [65]; ⁶ [72], [73]

3.2.4 Qualitative Bewertung der Antriebssysteme

Aus der Analyse der Energieträger und Speichertechnologien wird deutlich, dass sich die betrachteten Kraftstoffe hinsichtlich Energiedichte, Handhabbarkeit, Kosten und Verfügbarkeit stark unterscheiden. Für die qualitative Bewertung der Antriebssysteme inkl. zugehöriger Speichertechnologie lassen sich daraus jene Kombinationen ableiten, die technisch und ökonomisch im Kontext der Bodenseeschifffahrt als relevant erscheinen.

HVO weist nahezu identische Energieeigenschaften wie fossiler Diesel auf und kann mit bestehenden Motoren genutzt werden. Daher wird die Option eines Verbrennungsmotors mit HVO berücksichtigt. Dennoch ist trotz seiner guten Eigenschaften als direktes Substitut anzumerken, dass mithilfe von HVO keine komplette Klimaneutralität erreicht

...werden kann und die Verfügbarkeit in großem Maßstab ein erhebliches Problem darstellt.

Methanol wird aufgrund seines flüssigen Aggregatzustandes bei Umgebungsbedingungen und den vorhandenen Erfahrungen aus Pilotprojekten in Kombination mit Verbrennungsmotor als möglicher Pfad betrachtet, auch wenn zusätzliche Anpassungen an Tank- und Sicherheitssystemen erforderlich sind.

Für bereits vorhandene dieselelektrische Antriebe ergibt sich die Möglichkeit einer Umrüstung auf ein hybridelektrisches System mit Verbrennungsmotor (ICE, engl.: Internal Combustion Engine) und Generator in Kombination mit Batteriespeichern, wobei HVO oder Methanol als Energieträger eingesetzt werden können. Ein solcher Retrofit umfasst die Anpassung der mechanischen Kraftübertragung zwischen Dieselmotor und Propeller: Integration eines Generators zur elektrischen Energieerzeugung gekoppelt an den vorhandenen Dieselmotor, den Einbau eines Akkumulators, Leistungsschaltern und Transformatoren zur Energieverteilung, sowie die Installation von elektrischen Motoren zur Propulsion. Das Einbringen einer größeren Akkukapazität in ein solches (Diesel-) elektrisches System reduziert weiter den Kraftstoffverbrauch und ermöglicht eine höhere Gesamteffizienz.

Parallel dazu wird die Option eines hybridelektrischen Antriebs mit Brennstoffzelle und Akku untersucht, da Wasserstoff hier seine Vorteile hinsichtlich Emissionsfreiheit ausspielen kann und mithilfe der Energiewandlung via Brennstoffzelle eine deutliche Effizienzsteigerung ermöglicht.

Schließlich wird mit dem vollelektrischen Antrieb auf Basis von Batteriespeichern eine Lösung betrachtet, die lokal emissionsfrei arbeitet, jedoch aufgrund der geringen Energiedichte der Batterien vor allem für kürzere Einsatzprofile geeignet ist.

Damit konzentriert sich die qualitative Bewertung auf fünf Antriebssysteme, die sowohl die technische Machbarkeit als auch die spezifischen Anforderungen der Bodensee-schifffahrt abbilden.

Einen qualitativen Vergleich der betrachteten Antriebssysteme in Kombination mit den benötigten Speichersystemen findet sich in Tabelle 3-8. Die Tabelle verdeutlicht, dass Verbrennungsmotoren mit HVO oder Methanol durch ihre Einfachheit, geringen Investitionskosten und etablierten Speicherlösungen zwar kurzfristig praktikabel sind, jedoch klare Defizite bei Wirkungsgrad und Klimaneutralität aufweisen. Hybride Systeme können als Übergangstechnologie dienen, indem sie die Vorteile flüssiger Kraftstoffe mit elektrischer Effizienz kombinieren. Brennstoffzellensysteme mit Wasserstoff stellen trotz derzeit hoher Kosten und komplexer Speichertechnik in naher Zukunft eine vielversprechende Lösung dar, da sie hohe Wirkungsgrade mit vollständiger Klimaneutralität verbinden. Der vollelektrische Antrieb bietet die besten Wirkungsgrade und Emissionsfreiheit, stellt jedoch aufgrund des hohen Platz- und Gewichtsbedarfs der Batteriesysteme einige Herausforderungen dar.

Tabelle 3-8: Qualitative Bewertung der Antriebs- und Speichertechnologien

	Verbrennungsmotor		Hybride Antriebssysteme		Voll- elektrisch
	HVO	MeOH	ICE (HVO/MeOH) + Akku	FC (H ₂) + Akku	Elektrische Energie
	Konv. Tank	Konv. Tank	Konv. Tank, Akku	Druckspeicher (350 – 700 bar), Akku	Akku
Komplexität	++	+	o	--	++
Wirkungsgrad	--	--	o	+	++
Platz- und Ge- wichtsbedarf für Antriebs- system und Speicher	++	+	o	-	--
Investitions- kosten	++	+	o	--	-
Klimaneutralität	--	o	-	++	+
Fazit	++	+	-	--	++

++ sehr gut; + gut; o neutral; - schlecht; --sehr schlecht

Das Fazit in Tabelle 3-8 verdeutlicht, dass hinsichtlich der Kombination aus Antriebssystem und Speicher das Brennstoffzellenhybrid- und voll-elektrische Systeme Klimaneutralität und die höchste Effizienz bieten, jedoch durch Platz- und Gewichtsbedarf limitiert sind. Verbrennungsmotoren mit HVO oder Methanol bleiben für kurzfristige Emissionseinsparmaßnahmen praktikabel und wirtschaftlich, während hybride Systeme eine Übergangslösung darstellen. Brennstoffzellen mit Wasserstoff weisen großes Potenzial für klimaneutrale Antriebe auf, sind aktuell jedoch durch hohe Kosten und Speicheranforderungen eingeschränkt.

Hervorzuheben ist der voll-elektrische Antrieb. Die technologische Entwicklung im Batteriebereich verläuft derzeit äußerst dynamisch. Sowohl Energiedichte, Leistungsfähigkeit als auch Ladegeschwindigkeit moderner Akkumulatoren nehmen stetig zu, während die spezifischen Kosten weiter sinken. Diese Fortschritte erweitern die Einsatzmöglichkeiten batterieelektrischer Antriebe zunehmend auch in der Berufsschifffahrt. Besonders für die Fahrgastschifffahrt auf dem Bodensee könnten vollelektrische Systeme künftig eine attraktive Option darstellen. Auf festgelegten Linien mit klar definierten Routen und planbaren Aufenthaltszeiten an den Anlegestellen lassen sich Ladefenster zuverlässig in den Fahrplan integrieren, was einen effizienten und emissionsfreien Betrieb ermöglicht. Das Fahrgastschiff MS Insel Mainau, das bereits erfolgreich voll-elektrisch betrieben wird, bestätigt die technische Machbarkeit und zeigt, dass sich solche Konzepte auch im regulären Fahrgastbetrieb wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll umsetzen lassen.

3.3 Infrastrukturkonzepte für alternative Kraftstoffe

3.3.1 Aufbau und sicherheitstechnische Aspekte von Tankinfrastrukturen

Eine Wasserstofftankstelle besteht im Grundaufbau aus der Anlieferung, Kompression, Speicherung und Abgabe des Kraftstoffs (vgl. Abbildung 3-11). In der Praxis erfolgt die Anlieferung häufig über Lkw in Niederdrucktanks mit Drücken bis etwa 200 bar. Anschließend wird der Wasserstoff mithilfe eines Kompressors auf das für die Betankung notwendige Hochdruckniveau – z.B. 450 bar – gebracht. Dabei ist zu beachten, dass keine Verunreinigungen durch den Kompressor in den Wasserstoff gelangen dürfen, da insbesondere PEM-Brennstoffzellen sehr hohe Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs stellen [74]. Alternativ kann die Speicherung zunächst in stationären Niederdrucktanks erfolgen, wobei der Kompressor erst im Anschluss den Druck für die Abgabe an der Zapfsäule anpasst.

Für die Betankung von Wasserstofffahrzeugen existieren bereits internationale Richtlinien, die unter anderem eine Begrenzung der Temperatur im Tank während des Befüllvorgangs auf maximal 85 °C vorschreiben. Aufgrund der hohen Druckunterschiede kann es beim Befüllvorgang jedoch zu einer Temperaturerhöhung kommen, sodass in vielen Fällen ein Kühlsystem zwischen Tank und Zapfsäule notwendig ist. Die Zapfsäule selbst ähnelt in ihrer Funktion einer konventionellen Tankstelle; entscheidend ist jedoch die Integration eines benutzerfreundlichen Interfaces, das den Tankvorgang überwacht und sicherstellt. [74]

Eine wesentliche sicherheitstechnische Herausforderung ergibt sich aus den physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff. Aufgrund seiner geringen Molekülgröße diffundiert dieser durch Materialien und Dichtungen, weshalb höchste Anforderungen an die Auswahl der verwendeten Werkstoffe und Verbindungselemente gestellt werden müssen [32]. Kommt es zu einem Austritt, besteht in unmittelbarer Nähe Explosionsgefahr, da Wasserstoff in Luft ein zündfähiges Gemisch in den Zündgrenzen von 4-75% Wasserstoffanteil (vgl. Tabelle 3-5) ausbildet. Außerdem benötigt Wasserstoff eine geringe Zündenergie von 0,02 mJ [75]. Das größte Risiko bei Wasserstofftankstellen liegt daher im unkontrollierten Austritt von Wasserstoff. Gemäß Abbildung 3-11 kann es in allen wasserstoffführenden Bereichen zum Austritt kommen. Die Gründe dafür können zum einen im technischen Versagen von Anlagenteilen liegen (Korrosion, Diffusion, Alterungsprozesse, Ventilleckagen) [76]. Zum anderen liegt die mögliche Fehlerquelle in der Anwendung durch bspw. falsches Anbringen von Verbindung, Fahrzeugkollisionen oder Abfahrt mit eingestecktem Zapfhahn [75].

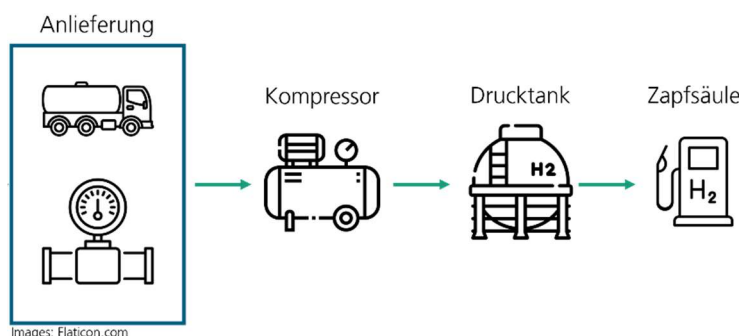


Abbildung 3-11: Schematischer Aufbau einer Wasserstoff-Tankinfrastruktur nach [74]

Ein Austritt von Wasserstoff muss nicht zwangsläufig zu einem Feuer oder einer Explosion führen. Die Abbildung 3-12 zeigt einen Ereignisbaum, der zeigt welche möglichen Verläufe ein Austritt von Wasserstoff haben kann. Die Abbildung zeigt, dass Wasserstoff sich direkt am Austrittspunkt entzünden kann. Bei der verspäteten Zündung sind die Folgen stark vom Ort abhängig an dem sich der Wasserstoff entzündet. Der harmloseste Fall ist der Austritt ohne Entzündung, bei dem der Wasserstoff sich nach Austritt in der Atmosphäre verteilt [76].

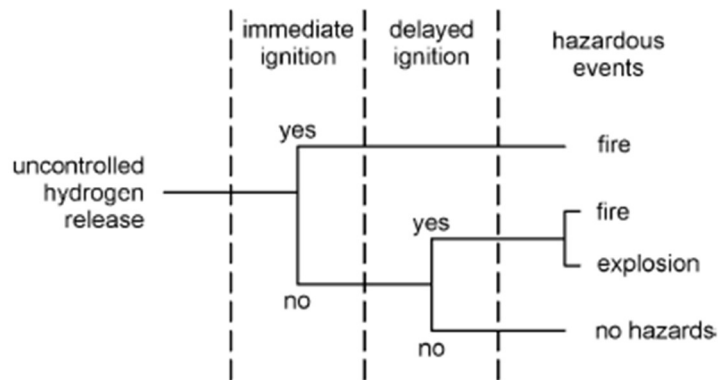


Abbildung 3-12: Ereignisbaum für den unkontrollierten Austritt von Wasserstoff [75]

Um einen sicheren Betrieb der Wasserstofftankstelle zu gewährleisten, sollten in der Konzeptionierung sogenannte Abstandsflächen zwischen den Gebäuden berücksichtigt werden. Eine Abstandsfläche beschreibt im vorliegenden Fall die sichere Distanz von Gebäuden und Personen zum Ort des Wasserstoffaustritts [77]. Pauschal lassen sich die benötigten Abstandsflächen für die einzelnen Teilbereiche der Tankstelle nicht abschätzen, da diese von unterschiedlichen Faktoren abhängen und somit einer vor Ort Analyse bedürfen. Für die Ermittlung von Abstandsflächen sind folgende Parameter zu berücksichtigen:

- Windgeschwindigkeit,
- Windrichtung in Bezug auf die Leckage,
- Austrittsrichtung des Wasserstoffs,
- Größe der Leckage,
- Druck im Austrittsbereich,
- Austrittsmenge,
- Bauliche Gegebenheiten. [75], [76], [77]

Die Abbildung 3-13 zeigt eine Analyse einer beispielhaften Wasserstofftankstelle hinsichtlich der Wirkradien in Meter bei Wasserstoffaustritt. Diese Tankstelle besteht gemäß Abbildung 3-11 aus einem Anlieferungsbereich für Wasserstofftrailer mit einem Fassungsvermögen von 100 kg und einem Druck von 200 bar. Außerdem ist in der Anlage ein Hochdrucktank verbaut. Dieser wird bei 900 bar betrieben und beinhaltet 25 kg Wasserstoff. Die Zapfsäule hat ein Druckniveau von 350 bar und speichert ebenfalls 25 kg Wasserstoff. Außerdem wird angenommen, dass die vollständige Menge Wasserstoff im jeweiligen Bereich Austritt und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s vorliegt, die in Richtung der Leckage wirkt.

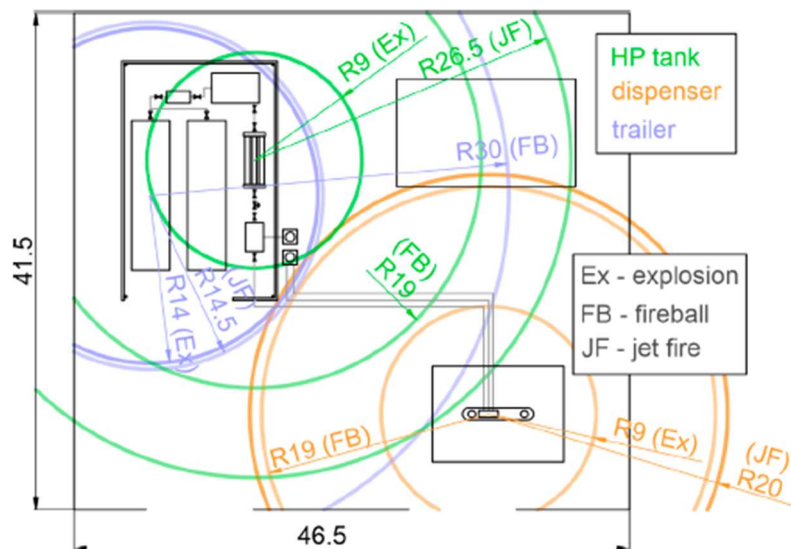


Abbildung 3-13: Gefahrenbereiche (Hazard-Zones) einer Wasserstoff-Tankanlage inkl. Anlieferungsstandort und Zapfanlage [75]

In der Abbildung 3-13 sind die Bereiche zu sehen, in denen es zu tödlichen Unfällen kommen kann, wenn der jeweilige Schadensfall eintreten würde. Die Gefährdung besteht je nach Event durch die Druckwelle der Explosion, Trümmerteile oder durch die Wärmestrahlung der Flammen. Darüber hinaus zeigen Ergebnisse ähnlicher Analysen, dass bei einem Arbeitsdruck von 700 bar mit einem Riss im Trommelfell gerechnet werden muss, wenn Menschen sich in einem 60m Radius von der Explosion aufhalten und Scheiben im Radius von 100 m bersten können [78].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Wasserstofftankstellen in besiedelten Gebieten ein Sicherheitsrisiko für Häuser und Bewohnende darstellt [76]. Zum sicheren Betrieb sollten die Abstandsflächen der einzelnen Tankstellenbereiche berücksichtigt werden, da es sonst zu Kettenreaktionen kommen kann und weitere Wasserstoffleckagen entstehen [76], [77]. Zusätzlich können Sicherheitssysteme in die Tankstelle eingebracht werden. Dazu zählen Wasserstoffsensoren, automatische Wasserstoffabschaltungen und Brandschutzwände [76]. Diese erhöhen die Betriebssicherheit der Wasserstofftankstelle weiter und wirken sich positiv auf die benötigten Abstandsflächen aus.

Im Gegensatz dazu ähnelt die Infrastruktur für HVO und Methanol grundsätzlich der konventionellen Dieseltankstelle. Eine schematische Darstellung für zentral benötigte Komponenten ist in Abbildung 3-14 gegeben. Die Anlieferung erfolgt in der Regel per Tanklastwagen, von dem aus dem Kraftstoff über eine Pumpe in die stationären Lagertanks der Tankstelle überführt wird. Diese Tanks sind in der Regel unterirdisch installiert. Von dort fördert eine zweite Pumpe den Kraftstoff zu den Zapfsäulen. Für HVO gelten im Wesentlichen die gleichen Sicherheitsanforderungen wie für Diesel, da es sich um einen flüssigen Kraftstoff mit vergleichbaren Eigenschaften handelt.

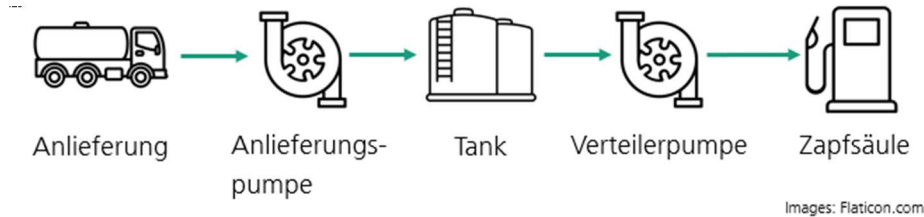


Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau einer konventionellen Tankinfrastruktur nach [79]

Die bestehende Infrastruktur lässt sich weitgehend für Methanol nutzen, erfordert jedoch Anpassungen an die spezifischen Eigenschaften des Kraftstoffs [24]. Aufgrund seiner Toxizität sollte bei Betankungen im größeren Maßstab die Handhabung ausschließlich durch geschultes Personal erfolgen, da beispielsweise bei Leckagen größere Mengen Methanol austreten können oder im Bereich des Übergangs von Tankrüssel zu Tankeingang giftige Dämpfe entstehen [32].

Eine besondere Herausforderung stellt die Brandgefahr dar: Methanol brennt mit einer nahezu unsichtbaren, rauchfreien Flamme, wodurch Brände nur schwer zu erkennen sind. Zudem kann Methanol selbst bei einer Verdünnung mit Wasser bis zu 25 % weiterhin brennbar sein, sodass herkömmliche Löschverfahren nicht ausreichen. Daher sind spezielle Feuerlöscher und zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zwingend erforderlich [32]. Insgesamt existiert international bereits Erfahrung in der Handhabung und Lagerung von Methanol als chemischer Rohstoff. Diese Erfahrungen können für die Entwicklung von Methanol-Tankstellen genutzt werden.

3.3.2 Verfügbarkeit von Infrastruktur zur landseitigen Betankung

HVO weist auch hier eine sehr hohe Kompatibilität mit bestehenden Diesel-Infrastrukturen auf. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit zu fossilen Dieselmotorkraftstoffen kann es in vorhandenen Rohrleitungen, Lagertanks, Versorgungssystemen und Motoren ohne wesentliche Modifikationen genutzt werden. Lediglich eine vorherige Reinigung und Wartung der Tanks wird empfohlen, um Verunreinigungen zu vermeiden. Besondere Aufmerksamkeit ist zudem der Vermeidung von Wasserkontakt im Tank- und Fördersystem zu widmen, da dies erheblich die Kraftstoffqualität beeinträchtigen kann. Ein wesentlicher Vorteil von HVO gegenüber anderen nachhaltigen Kraftstoffen und Biokraftstoffen besteht in der sehr geringen Korrosivität gegenüber den in der maritimen Infrastruktur üblichen Materialien, was die Betriebssicherheit und Lebensdauer erhöht [80].

Für Methanol gilt die benötigte Infrastruktur als weitgehend ausgereift. Die Technologien für eine sichere Lagerung und Handhabung an Bord sowie an Land sind verfügbar und, wie zuvor erwähnt, durch die IMO und ISO geregelt, sodass Methanol bereits heute als technisch integrierbarer Energieträger betrachtet werden kann [24].

Bei Batteriesystemen liegt die Herausforderung primär auf der Bereitstellung einer geeigneten Ladeinfrastruktur. Der Energiebedarf kann in Abhängigkeit von Speicherkapazität und gewünschter Ladezeit sehr hoch ausfallen: So erfordert beispielsweise das Laden von 1.000 kWh in 30 Minuten eine Anschlussleistung von rund 2.000 kW [27]. Dies stellt Anforderungen an die lokale Netzinfrastruktur dar und kann insbesondere in Häfen mit schwächer ausgebautem Netz erhebliche Investitionen erforderlich machen. Ein Vorteil von Batteriesystemen liegt jedoch in der hohen Austauschbarkeit der Speichertechnologie. Die grundlegende Netz- und Ladeinfrastruktur kann für verschiedene Batteriegenerationen wiederverwendet werden, da Schnittstellen über standardisierte Leistungselektronik definiert sind [27]. Gleichzeitig wird empfohlen, kleinere Ladeeinheiten zu bevorzugen, um die Belastung des Netzes zu reduzieren und eine schrittweise Integration in die Hafeninfrastruktur zu ermöglichen. Der Aufbau eines vollständigen

Netzes an Schnellladestationen wird insbesondere in abgelegenen Häfen eine Herausforderung darstellen, da dort häufig die notwendige Netzkapazität im Multi-Megawatt-Bereich nicht vorhanden ist [81]. In der stark besiedelten Umgebung des Bodensees ist dies jedoch nur bedingt zu erwarten. Genauer hierzu folgt in Kapitel 3.3.3.

Für Wasserstoff ist die erforderliche Infrastruktur zur Speicherung und Betankung im schiffahrtlichen Kontext bislang nur eingeschränkt verfügbar und kann derzeit nicht als ausgereift bewertet werden. Technologien für die Bereitstellung von komprimiertem Wasserstoff (CH_2) bei 350–700 bar im Verkehrssektor sind jedoch bereits zunehmend verbreitet. Die Speicherung erfordert spezielle Hochdrucktanks, Kompressoren, Kühlaggregate sowie Druckregelungssysteme, deren Implementierung in Hafenanlagen kostspielig und technisch komplex ist. Bei flüssigem Wasserstoff (LH_2) sind die Anforderungen nochmals höher: Für die Lagerung bei -253 °C sind Kryotanks mit aufwendiger Isolierung und Boil-off-Management erforderlich, was sowohl an Land als auch an Bord erhebliche Investitionen und Sicherheitsmaßnahmen bedingt.

Hinzu kommt, dass standardisierte Verfahren für die Wasserstoffbetankung in der Schifffahrt bislang fehlen. Anders als beim Dieselmotoren sind die Betankungsprozesse stark vom Schiffsdesign abhängig, was die Entwicklung universeller Schnittstellen und international gültiger Vorschriften erschwert. Der Aufbau einer entsprechenden Bunker- und Tankinfrastruktur erfordert daher nicht nur technologische Anpassungen, sondern auch regulatorische Harmonisierung. Pilotprojekte wie containerisierte Betankungslösungen zeigen mögliche Ansätze für kleine und mittlere Schiffe. Insgesamt ist die landseitige Infrastruktur für Wasserstofftanks im Bereich kleinerer Leistungsklassen am Markt erhältlich, jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden. [82]

Zusammenfassend zeigt sich, dass HVO und Methanol aufgrund ihrer Flüssigbrennstoff-Eigenschaften weitgehend mit bestehender Infrastruktur kompatibel sind, während für Batteriesysteme gegebenenfalls Erweiterungen der Netzkapazitäten erforderlich werden. Eine Aussage zu den konkreten nötigen Erweiterungen der Netzkapazitäten sowie deren Kosten kann im Umfang dieser Studie nicht getroffen werden. Dennoch erfolgt eine Einschätzung zu der gesamt benötigten Ladeleistung um den Bodensee in folgendem Kapitel 3.3.3. Wenn Erfahrungen aus dem Straßenverkehr genutzt werden, können bereits jetzt Wasserstoff-Tankinfrastrukturen geschaffen werden. Jedoch besteht hier weiterhin Optimierungs- und Standardisierungsbedarf. Die Bewertung der Infrastrukturverfügbarkeit beinhaltet damit sowohl technologische Reife als auch systemische Anforderungen an die lokale Energiebereitstellung.

3.3.3 Berechnung der nötigen Netzanschlusskapazitäten für Elektromobilität

Die vollständige Elektrifizierung der Bodenseeschifffahrt mit Batterie-elektrischen Antriebssystemen erfordert eine Abschätzung des zukünftigen Energie- und Leistungsbedarfs, um die notwendigen Netzanschlusskapazitäten im Uferbereich rund um den Bodensee zu bestimmen. Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis der im Kapitel 2.2.1 ermittelten Kraftstoffverbräuche und der typischen Betriebsprofile zweier Szenarien – „ermittelte Fahrprofile“ und „Höchstgeschwindigkeit“ – den resultierenden elektrischen Energiebedarf und die Obergrenze der maximal erforderlichen Ladeleistungen zu quantifizieren.

Hierzu wurden zunächst die jährlichen Kraftstoffverbräuche der Freizeit- und Berufsschifffahrt in Kubikmeter in elektrische Energieäquivalente umgerechnet. Die Berechnung erfolgte über die Dichte und den Heizwert der jeweiligen Kraftstoffe (Benzin und Diesel) sowie unter Berücksichtigung der mittleren Wirkungsgrade von Zweitakt- und Viertakt-Ottomotoren (27,5%) und Dieselmotoren (35%) für die Bestimmung der nutzbaren Antriebsenergie. Daraus resultieren für das Szenario der ermittelten Fahrprofile Antriebsenergiebedarfe der Freizeitschifffahrt mit etwa 1.125 MWh und Berufsschifffahrt mit etwa 24.591 MWh, während für das Szenario der Höchstgeschwindigkeit

keit ein deutlich höherer Energiebedarf in der Freizeitschiffahrt von 9.514 MWh resultiert. Ein Überblick der ermittelten Antriebsenergiebedarfe findet sich in Tabelle 3-9.

Tabelle 3-9: Ermittlung der benötigten Antriebsenergie in Freizeit- und Berufsschiffahrt in den betrachteten Szenarien

Szenario "ermittelte Fahrprofile"				
Typ	Benzin [m³]	Diesel [m³]	Energie [MWh]	Antriebsenergie [MWh]
Freizeitschiffahrt:	230	164	3.651	1.125
Berufsschiffahrt:	10	7.167	70.279	24.591
Gesamt:	241	7.330	73.930	25.715
Szenario "Höchstgeschwindigkeit"				
Freizeitschiffahrt:	2.576	940	32.084	9.514
Berufsschiffahrt:	10	7.166	70.279	24.591
Gesamt:	2.586	8.107	102.363	34.105

Anschließend wurde der Primärenergiebedarf an elektrischer Energie für eine vollständige Elektrifizierung – 100% aller derzeit registrierten Boote auf dem Bodensee werden auf einen voll-elektrischen Antrieb umgerüstet – mit einem Ladeziel von 80% der Akkukapazität und einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Antriebssystems von 65% bestimmt (vgl. Tabelle 3-10). Unter diesen Annahmen ergibt sich ein jährlicher elektrischer Primärenergiebedarf von etwa 31.650 MWh in Szenario „ermittelte Fahrprofile und etwa 41.975 MWh in Szenario „Höchstgeschwindigkeit“.

Zur Abschätzung der benötigten Netzanschlusskapazität wurde zunächst der täglich maximale Energiebedarf definiert. Der tägliche Energiebedarf der Berufsschiffahrt beträgt im Durchschnitt 67 MWh für beide Szenarien. Aufgrund unterschiedlicher Fahrpläne im Sommer und Winter wurde für die Ermittlung des Maximums angenommen, dass dieser Wert im Sommer mit dem Faktor 2,5 höher liegt als im Jahresdurchschnitt. Somit ergibt sich für die Berufsschiffahrt ein maximaler Tagesbedarf im Sommer von etwa 168 MWh. Um für die Freizeitschiffahrt einen realistischen Tagesbedarf zu ermitteln, müssen sowohl die ausgeprägte Saisonalität der Bootsnutzung (siehe Abbildung 2-12) als auch der Umstand, dass nicht alle Boote gleichzeitig an einem Tag genutzt werden, berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis von maximalem Tagesenergiebedarf zu Jahresenergiebedarf dem Verhältnis von maximaler kumulierter Tagesdistanz zu kumulierter Jahresdistanz aller Boote entspricht. Die beiden letzten Werte wurden für Abbildung 2-12 mit 58.334 km bzw. 4.521.456 km, jeweils gemeinsam für beide Kategorien bestimmt. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von 0,013. Der maximale tägliche Energiebedarf ist also 1,3% des Jahresenergiebedarfs. Der tägliche Energiebedarf für die Freizeitschiffahrt beträgt somit für das Szenario der ermittelten Geschwindigkeitsprofile 14,6 MWh und 123,7 MWh für das Szenario Höchstgeschwindigkeit.

Für die Ermittlung der Ladeleistung wird eine gleichzeitige Ladung sämtlicher Akkus von 20% auf 100% innerhalb eines Zeitraums von 5 Stunden bei einem Ladewirkungsgrad von 90% angenommen. Daraus ergibt sich eine theoretische maximale Ladeleistung von etwa 50 MW für das Szenario der ermittelten Fahrprofile und 80 MW für das Szenario der Höchstgeschwindigkeit. Diese Werte verstehen sich als Obergrenze

für die benötigte Netzkapazität, die über Nacht an einem schönen Sommertag zur Verfügung stehen müssen.

Als zusätzliches Beispiel wird auf Basis von Tabelle 3-10 ein Szenario mit 80% Elektrifizierungsanteil, bzw. Ladebedarf der Boote am Bodensee und 8 Stunden Ladezeit – entspricht einer langsamen Ladung über Nacht – betrachtet, um den Einfluss reduzierter Gleichzeitigkeit und längerer Ladezeiten auf den Netzbedarf zu bewerten. Daraus resultiert eine praxisorientiertere benötigte Ladeleistung von 25 MW bis 40 MW, die rund um den Bodensee verfügbar sein muss.

Tabelle 3-10: Ermittlung der benötigten Leistung bei einer vollen Elektrifizierung der Boote am Bodensee

Kategorie	„ermittelte Fahrprofile“		„Höchstgeschwindigkeit“	
	Wert	Einheit	Wert	Einheit
Energiebedarf Freizeit	1.125	MWh/a	9.513,9	MWh/a
Max. täglicher Energiebedarf Freizeit	14,6	MWh/d	123,7	MWh/d
Energiebedarf Beruf	24.590,6	MWh/a	24.590,6	MWh/a
Max. täglicher Energiebedarf Beruf	168,4	MWh/d	168,4	MWh/d
Anteil Elektrifizierung	100	%	100	%
Ladewirkungsgrad	90	%	90	%
Ladezeit	5	Std.	5	Std.
Benötigte Ladung	80	%	80	%
Summe der benötigten elektrischen Energie	225,29	MWh/d	359,52	MWh/d
Benötigte Ladeleistung rund um den Bodensee	50,06	MW	79,89	MW

Da derzeit keine vollständigen Informationen über bestehende Anschlussleistungen oder verfügbare Netzkapazitäten rund um den Bodensee vorliegen, kann keine konkrete Aussage über den notwendigen Netzausbau getroffen werden. Eine belastbare Bewertung überschreitet den Rahmen dieser Studie und erfordert eine detaillierte Netzstrukturanalyse in Kooperation mit den regionalen Energieversorgern und Hafenbetreibern, um lokale Engpässe und technische Realisierungsoptionen zu identifizieren.

3.3.4 Kosten Infrastruktur

Für HVO liegen keine spezifischen Investitionskosten zur Tankinfrastruktur vor. Aufgrund der weitgehenden Kompatibilität mit bestehenden Dieselstrukturen – einschließlich Pipelines, Lagertanks und Zapfsäulen – sind jedoch keine nennenswerten Zusatzkosten für den Aufbau neuer Tankstellen zu erwarten. Vielmehr können bestehende Versorgungsketten genutzt werden. Lediglich kleinere Anpassungen, etwa Reinigungsmaßnahmen, Instandhaltung oder Materialprüfungen bei bestehenden Anlagen, können erforderlich sein [46], [80].

Für Wasserstoff liegen erste Kostenschätzungen aus realisierten Pilotprojekten vor. So wird für eine in Halle, Belgien gebaute Tankstelle inklusive alkalischen Elektrolyseur mit einer Leistung von 156 kW, einem 450-bar-Kompressor, einem 50-kg-Drucktank sowie einer Zapfsäule mit 350 bar Tankrüssel ein Gesamtinvestitionsvolumen von rund 1,15 Mio. € angegeben (Stand: 2017, exkl. Steuern).

Tabelle 3-9 zeigt die Kosten der einzelnen Komponenten im Überblick. Diese verteilen sich auf 422.760 € für den Elektrolyseur, 216.000 € für den Kompressor, 157.500 € für den Tank, 218.000 € für die Zapfsäule sowie 138.800 € für Integration, Zertifizierung und Genehmigungen [47]. Es ist anzumerken, dass durch die am Standort installierte Elektrolyseanlage keine Anlieferung von Wasserstoff via Tanklaster oder Pipeline erfolgen muss. Ohne der Installation einer eigenen Elektrolyseanlage belaufen sich also die Kosten auf etwa 730.300 € für das Errichten eines 50 kg Wasserstoffspeichers mit Tankinfrastruktur.

Tabelle 3-9: Aufgeschlüsselte Kosten für eine Wasserstoff-Tankinfrastruktur nach [71]

Komponente	Spezifikation	Preis in €
Elektrolyseur	156 kW	422,760
Kompressor	450bar	216,000
Tank	50kg bei 450bar	157,500
Zapfsäule	350bar	218,000
Andere Kosten (Integration/ CE-Zertifizierung, Erlaubnisse)	-	138,800

Problematisch ist jedoch, dass aktuelle Preise in der Regel nicht transparent veröffentlicht werden, was eine belastbare Kostenschätzung erschwert. Zudem hängen die Gesamtkosten stark von den standortspezifischen Gegebenheiten ab [74]. Allgemein wird für Wasserstofftankstellen mit Elektrolyseanlage für Tagesmengen von 200–300 kg ein Investitionsvolumen von etwa 1–2 Mio. € angegeben [74]. Ein Beispiel für eine aktuelle Anlage ist eine Tankstelle in Rostock, die mit rund 3 Mio. € Investitionskosten eine Tageskapazität von etwa 450 kg Wasserstoff mithilfe eines eigenen Elektrolyseurs bereitstellen kann [83].

Für eine Umrüstung von Dieseltanks zur Kompatibilität mit Methanol liegen derzeit keine konkreten Kostendaten zur Tankinfrastruktur vor, da bisherige Retrofits die ersten ihrer Art waren und daher mit erhöhten Kosten verbunden sind. Grundsätzlich kann aufgrund der Eigenschaften von Methanol eine weitgehende Nutzung bestehender Tanks und Rohrleitungen erfolgen, wobei zusätzliche Anforderungen an Materialwahl und Sicherheitssysteme berücksichtigt werden müssen. Es ist dennoch davon auszugehen, dass die Kosten deutlich unterhalb der der Wasserstoffinfrastrukturen liegen werden.

Für die Versorgung von Akkumulatoren mit elektrischer Energie ist ein leistungsfähiger Netzanschluss entscheidend. Während für kleinere Ladeleistungen konventionelle Landstromanschlüsse, wie sie derzeit bereits in Häfen vorhanden sind, ausreichend sind, erfordert der Betrieb von Schnellladestationen höhere Anschlusskapazitäten. Erfahrungen aus dem Pkw-Verkehr zeigen, dass Schnellladeinfrastruktur im Bereich von bis zu mehreren Hundert Kilowatt pro Ladepunkt ausgelegt wird, um Ladezeiten im Minuten- bis Stundenbereich zu ermöglichen. Übertragen auf den Schiffsverkehr bedeutet dies, dass insbesondere Einheiten mit hoher Leistung eine erhebliche Netzbelastung verursachen können. Abhängig von der lokalen Netzinfrastruktur sind daher In-

Investitionen in Transformatoren, Verstärkung von Leitungen und gegebenenfalls zusätzliche Energiespeicher erforderlich, um eine zuverlässige Ladeversorgung sicherzustellen. Hierzu lässt sich jedoch keine allgemeine Aussage tätigen und es muss im Einzelfall je nach Anforderungen und Ausführung genauer betrachtet werden.

Auf Basis der in Kapitel 3.3.3 dargestellten Ergebnisse lässt sich eine Spannweite für die maximal benötigte Leistung einer neu zu errichtenden Ladeinfrastruktur ermitteln. Je nach Szenario und Konfiguration, unter Annahme der gleichzeitigen Ladung aller Schiffe in fünf bis acht Stunden, ergibt sich der maximale Leistungsbedarf für den gesamten Bodenseeraum zu 25 MW bis 80 MW.

Auf Basis der Studie [84] wird angenommen, dass sich die Kosten für gängige Ladeanschlusspunkte wie in Tabelle 3-10 ergeben. Auf Basis der Verteilung der Ladeanschlüsse auf die Liegeplätze, ergeben sich auf die etwa 32.000 Liegeplätze:

69 stationäre Schnellladepunkte mit jeweils 100 kW, 1.074 Liegeplätze mit Zugang zu 22 kW-Ladern und die restlichen 30.857 mit einzeln abgesicherten 230 V CEE Anschlüssen mit jeweils 3,5 kW. Eine Übersicht sowie die zugehörige Kostenschätzung der neu zu errichtenden Ladeinfrastruktur – ohne Berücksichtigung potenzieller Netzausbaumaßnahmen – findet sich in Tabelle 3-10.

Tabelle 3-10: Kosten und Verteilung der Ladeanschlüsse an Liegeplätzen oder stationär nach [84]

	Preis (€)	Liegeplätze	Gesamtkosten
Schnellladepunkte (100 kW); stationär	75.000 €	69	5.175.000 €
22kW-Lader (Typ 2); stationär oder an Liegeplätzen	8.000 €	1.074	8.592.000 €
230 V CEE; an Liegeplätzen	1.000 €	30.857	30.857.000 €
Gesamt	-	32.000	44.624.000 €

Bei der Verteilung auf die Liegeplätze ergibt sich eine deutlich höhere Ladekapazität rund um den Bodensee von etwa 139 MW gegenüber dem maximal ermittelten Bedarf von 80 MW. Es ist anzumerken, dass die getroffenen Annahmen eher zu viel Bedarf prognostizieren, wodurch der Gesamtpreis und die -leistung als Obergrenze zu verstehen sind.

3.3.5 Qualitative Bewertung der landseitigen Infrastruktur

Tabelle 3-11 zeigt einen qualitativen Vergleich der Tankinfrastrukturen für die untersuchten Energieträger auf Basis von Verfügbarkeit und Investitionskosten auf Basis der umfangreichen Analyse von Xing *et al.* [63]. Die Bewertung der Tankinfrastruktur zeigt, dass HVO wie erwartet durch seine weitgehende Kompatibilität mit bestehender Diesel-Infrastruktur besonders vorteilhaft ist. Nur geringe Investitionen sind erforderlich, sodass HVO kurzfristig eine praktikable Lösung darstellt. Methanol ist ebenfalls einfach integrierbar, benötigt jedoch angepasste Materialien und zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen, wodurch der Aufwand etwas höher liegt. Wasserstoff erfordert dagegen den größten Investitionsbedarf: Druck- und Kryotanks sowie aufwendige Kompressor- und Kühlsysteme sind notwendig, während die Verfügbarkeit entsprechender Infrastruktur derzeit noch verhältnismäßig gering ist. Elektrische Energie kann in vielen Häfen über bestehende Landstromanschlüsse bereitgestellt werden, wobei für höhere Ladeleistungen in Einzelfällen zusätzliche Investitionen notwendig sind. Insgesamt ergeben sich daraus kurzfristige Vorteile für HVO und elektrische Energie, mittelfristiges Potenzial für Methanol und langfristige Perspektiven für Wasserstoff.

Tabelle 3-11: Qualitative Bewertung der landseitigen Tankinfrastruktur ausgewählter Energieträger

	HVO	MeOH	H ₂	El. Energie
Verfügbarkeit	+	o	-	+
Investitionen	+	+	-	+
Fazit	++	++	-	++

+ gut; o neutral; - schlecht

3.4 Bewertung alternativer Technologien

3.4.1 Allgemeine Einordnung alternativer Technologien

Für eine bessere Vergleichbarkeit ist in Tabelle 3-12 eine Kostenschätzung für die effektive Antriebsenergie unter Berücksichtigung der angenommenen Wirkungsgrade für die verschiedenen Antriebssysteme gegeben.

Tabelle 3-12: Annahme der Kosten für die resultierende Antriebsleistung der betrachteten Antriebstechnologien

	Verbrennungsmotor		Hybridelektrisch		Voll-elektrisch	
Kraftstoff	Diesel	HVO	MeOH	ICE (HVO / MeOH) + Akku	FC (H ₂) + Akku	Elektrische Energie
Speichertechnologie	Konv. Tank	Konv. Tank	Konv. Tank	Konv. Tank, Akku	Druckspeicher (350 – 700 bar), Akku	Akku
Wirkungsgrad Antriebssystem Tank-to-Propeller	35%	35%	30%	40%	50%	65%
Preis für Energieträger in €/MWh_{PE}	165 / 117 *	179	295	179 / 295	390	140 / 120 *
Kostenschätzung für Antriebsenergie in €/MWh¹	857 / 610 *	930	1.788	771 / 1.418	905	392 / 336 *

¹ Der Wirkungsgrad von Propeller zu resultierender Antriebsleistung wird mit 55% für alle Antriebe gewählt;

² Annahme: 90% der Energiebereitstellung durch Verbrennungsmotor, 10% durch Batteriesystem;

³ Annahme: 50% der Energiebereitstellung durch Brennstoffzellensystem, 50% durch Batteriesystem;

* Steuerbefreiung für die Berufsschifffahrt

HVO liegt mit ca. 930 €/MWh leicht über den Antriebskosten mit konventionellem Diesel und bietet durch seine bessere Klimabilanz eine mögliche Übergangslösung, ist jedoch aufgrund begrenzter Rohstoffverfügbarkeit langfristig nicht skalierbar. Methanol erweist sich mit etwa 1.788 €/MWh als deutlich teurer und daher ökonomisch weniger attraktiv, wenngleich es sich relativ einfach in bestehende Infrastrukturen integrieren lässt. Nichtsdestotrotz ist anzumerken, dass Methanol-basierte Antriebssysteme einen deutlichen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten können. Sobald sich abzeich-

net, welche Kosten für grünen Methanol an den Verbraucher weitergegeben werden, sollte auch diese Variante im Detail erneut betrachtet werden, da hier ein guter Kompromiss aus Nachhaltigkeit und kurzfristiger Implementierbarkeit besteht.

Hybridelektrische Systeme mit Verbrennungsmotor und Akku senken die Kosten je nach Kraftstoff auf etwa 771–1.418 €/MWh und stellen damit eine ökonomisch wie ökologisch vorteilhaftere Zwischenlösung dar. Brennstoffzellen-Hybride mit Wasserstoff liegen mit etwa 905 €/MWh in einem ähnlichen Bereich, sind jedoch aufgrund der hohen Infrastrukturkosten derzeit nur eingeschränkt als unmittelbare Lösung zu betrachten. Die vollelektrischen Systeme zeigen mit rund 392 €/MWh, bzw. 336 €/MWh bei Annahme einer Steuerbefreiung, die niedrigsten Kosten für Antriebsenergie und gleichzeitig die höchste Nachhaltigkeit, ihre Reichweite bleibt jedoch vorerst je nach verfügbarem Raum und Gewicht durch die begrenzte Energiedichte der Akkumulatoren beschränkt.

Insgesamt wird deutlich, dass die vollelektrische Schifffahrt die ökonomisch und ökologisch vorteilhafteste Perspektive für kurze Strecken bietet, während Brennstoffzellen-Hybride langfristig für größere Schiffsklassen mit höherem Energiebedarf relevant werden. Je nach Komposition aus Brennstoffzellenleistung und Akkukapazität können hier für den individuellen Bedarf passende Lösungen gefunden werden.

Das Fazit aus den zuvor durchgeführten qualitativen Bewertungen in den Kategorien Energieträger, Antriebs- und Speichersystem sowie landseitige Infrastruktur ist in Tabelle 3-13 dargestellt.

Tabelle 3-13: Qualitative Bewertung alternativer Kraftstoffe zum Einsatz am Bodensee

	HVO	Methanol	Wasserstoff	Batterien
Energieträger	--	---	+++	/
Antriebs- und Speichersystem	++	+	-	++
Landseitige Infrastruktur	++	++	-	++
Fazit	++	0	+	++++

++ sehr gut; + gut; 0 neutral; - schlecht; --sehr schlecht

Für die Bodenseeschifffahrt zeigt die qualitative Bewertung der Antriebsoptionen, dass HVO eine unmittelbare Möglichkeit zur schnellen Emissionsreduktion bietet, indem bestehende Motoren ohne großen Aufwand weiterbetrieben werden können. Allerdings ist HVO nicht vollständig klimaneutral und wird durch die limitierte Rohstoffverfügbarkeit sowie Abhängigkeit von Importen langfristig eingeschränkt.

Methanol bietet grundsätzlich Potenzial als nachhaltiger Kraftstoff, doch bestehen noch Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Marktverfügbarkeit von grünem Methanol und der Toxizität im Hinblick auf den Bodensee. Aufgrund seiner höheren Energiedichte im Vergleich zu Wasserstoff und Akkumulatoren erscheint Methanol eher als eine emissionsfreie Lösung für die maritime Schifffahrt mit längeren Distanzen als für den regionalen Einsatz am Bodensee geeignet.

Wasserstoff stellt langfristig eine relevante Lösung für Anwendungen mit mittlerem Leistungs- und Reichweitenbedarf dar, da er durch seine sehr gute Ökobilanz und die lokale Emissionsfreiheit einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten kann.

„Gegenwärtig wird sein Einsatz jedoch noch durch fehlende wirtschaftliche Tank- und Speicherinfrastrukturen sowie das Fehlen international standardisierter Verfahren für die Bunkerung eingeschränkt. Insbesondere die hohen Investitionskosten für Druck- und Kryotanks sowie die sicherheitsrelevanten Anforderungen an das Handling begrenzen derzeit die unmittelbare Einsatzfähigkeit. Durch laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte ist jedoch absehbar, dass Kostenreduktionen und infrastrukturelle Fortschritte mittelfristig die Nutzung von Wasserstoff auch in regional begrenzten Schifffahrtsanwendungen wie auf dem Bodensee erleichtern werden.“

Im Gegensatz dazu ist die Technologie der batterieelektrischen Antriebe bereits weitgehend ausgereift. Für Schiffe mit kurzen Fahrstrecken und geringem bis moderatem Energiebedarf, wie sie auf dem Bodensee typisch sind, bietet die Kombination aus ausgereifter Ladeinfrastruktur, stetig sinkenden Batteriekosten und zunehmender Energiedichte die derzeit attraktivste und nachhaltigste Option.

3.4.2 Differenzierte Bewertung alternativer Technologien für den Einsatz auf dem Bodensee

Für eine Einordnung der untersuchten alternativen Antriebs- und Speichertechnologien erfolgt in Tabelle 3-14 eine differenzierte Analyse hinsichtlich des Einsatzes in der Freizeit- und Berufsschifffahrt.

Für die Freizeitschifffahrt am Bodensee bietet der batterieelektrische Antrieb die derzeit nachhaltigste und praktikabelste Lösung – emissionsfrei, leise und mit der vorhandenen Strominfrastruktur kompatibel. Eine Schnelllade-Infrastruktur ist in der Regel aufgrund gelegentlicher Fahrten nur bedingt nötig. Nimmt man den maximalen Bedarf an elektrischer Leistung für eine gesamte Elektrifizierung der Bodenseeschiffe an, so muss im Detail mit Netzbetreibern und Hafenbetreibern gesprochen werden, um mögliche Zusatzkosten für Netz-Infrastrukturausbau im Vorfeld zu klären. HVO ist eine Übergangstechnologie für Bestandsboote, bei denen beispielsweise aufgrund ihres Alters keine Umrüstung erfolgen soll.

In der Berufsschifffahrt kann HVO kurzfristig den Betrieb bestehender Flotten klimafreundlicher gestalten, während batterieelektrische Systeme insbesondere bei planbaren Einsatzprofilen wie Fähren langfristig wirtschaftlicher und nachhaltiger sind. Wasserstoff wird mit zunehmender Infrastrukturentwicklung zur relevanten Zukunftstechnologie für Schiffe mit höherem Energiebedarf, während Methanol wegen seiner Toxizität und der derzeit offenen Kostenentwicklung am Bodensee derzeit nur begrenzt infrage kommt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die dynamische Entwicklung verschiedener Antriebskonzepte für die maritime Schifffahrt durchaus Auswirkungen auf den Betrieb kleinerer Leistungsklassen haben kann. Daher ist es nicht auszuschließen, dass Wasserstoff oder auch Methanol in naher Zukunft eine wirtschaftliche Alternative darstellen kann.

Tabelle 3-14: Zusammenfassen der Vor- und Nachteile alternativer Technologien für den Einsatz auf dem Bodensee in Freizeit- und Berufsschifffahrt

Energieträger	Freizeitschifffahrt		Berufsschifffahrt	
HVO	+ direkter Ersatz für Diesel + Emissionsreduktion ohne neue Infrastruktur + hohe Energiedichte + Nutzung bestehender Tankinfrastruktur	- nicht vollständig klimaneutral (bis ~90 %) - höhere Kosten als Diesel	+ ermöglicht Weiterbetrieb bestehender Flotten ohne Ausfallzeiten + geringer Schulungs- und Wartungsaufwand	- langfristig begrenzte Verfügbarkeit - Nachhaltigkeit abh. von Rohstoffherkunft
Methanol	+ flüssig, einfache Handhabung + bilanziell eine Emissionsreduktion von bis zu 100% möglich	- toxisch; daher insb. Gefahr im Freizeitbetrieb - unklare Verfügbarkeit und Kosten	+ Regulatorien für Handhabung bereits vorhanden + gute Eignung für Umrüstung von Berufsschiffen	- zusätzliche Sicherheitsanforderungen - Risiken bei Leckagen für Gesundheit und Umwelt - keine Planbarkeit aufgrund unklarer Kostenentwicklung
Wasserstoff	+ emissionsfrei und geräuscharm im Betrieb + zukunftsorientierte Technologie + zunehmend kostengünstiger	- komplexe Speicherung und Betankung - fehlende Tankinfrastruktur (Neubau erforderlich) - hohe Investitionskosten	+ sehr gute Ökobilanz + perspektivisch geeignet für Fähren und gewerbliche Boote mit regelmäßigem Betrieb	- (noch) kein wirtschaftlicher Betrieb möglich - fehlende Standards bei Bunkerung
Batterie-Elektrisch	+ ideal für planbare Tagesausflüge + Ladezeiten mit Freizeitbetrieb gut vereinbar + geräuschlos und emissionsfrei	- hohe Anschaffungskosten - Ladezeiten abhängig von Landstromanschluss	+ besonders geeignet für Fähren und Linienverkehr mit festen Liegezeiten + geringe Betriebskosten + wartungsarm	- punktuelle Netzanschlüsse mit hoher Leistung erforderlich - Gewicht und Platzbedarf bei großem Reichweitebedarf kann zu Reduktion von Gästen oder Transportgut führen

4 AP 3: Schiffs- und bootsbauliche Implikationen

In diesem Kapitel werden die in AP1 abgeleiteten Dekarbonisierungsalternativen hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien bewertet. Dabei werden die Ergebnisse aus AP2 herangezogen und um technische Bewertungen ergänzt, um Bewertungsmatrizen aufzustellen.

Wichtige Parameter bei der technischen Bewertung von Teilen für Boote und Schiffe sind Masse und Volumen der Komponenten, da Ersteres Hydrostatik und Leistung beeinflusst und Letzteres nur begrenzt zur Verfügung steht. Für Umbauten ist außerdem die Kompatibilität mit dem bestehenden Antriebsstrang relevant. Sowohl für Umrüstungen als auch für Neubauten sind die Verfügbarkeit der Komponenten sowie Installationskosten wichtig. Für die praktische Nutzung spielen die Energiekosten, Lade- bzw. Tankzeiten sowie erreichbare Geschwindigkeit und Reichweite eine Rolle, wobei die beiden letzten Parameter verknüpft sind, da die Geschwindigkeit unmittelbaren Einfluss auf die Reichweite hat.

4.1 Dekarbonisierungsalternative 1: Batterieelektrischer Antrieb

4.1.1 Bewertung des Antriebs

Laut Ergebnissen von AP 2 ist elektrischer Strom in Mitteleuropa praktisch uneingeschränkt verfügbar. Gegenüber einem Dieselmotor sind die Energiekosten eines für einen batterieelektrischen Antrieb um ca. 54% niedriger.

Die wichtigsten Komponenten für batterieelektrische Antriebe, der Motor und die Batterie sind ebenfalls gut verfügbar. Für den Sportbootbereich gibt es mittlerweile eine große Auswahl an elektrischen Außenbordmotoren bis mindestens 225kW Dauerleistung [85], [86], [87], [88], [89]. Bei Innenbordmotoren reicht die Spanne bis zu einer Leistung von 300kW [90], [91], [92]. Für größere Schiffe sind Elektromotoren schon länger als Teil von z.B. dieselektrischen Antrieben im Einsatz und somit ebenfalls verfügbar [93], [94], [95]. Batterien sind in unterschiedlichen Formen und mit unterschiedlichen Kapazitäten und Nennspannungen für Sportboote verfügbar, oft in Verbindung mit dem Motor. Es gibt mehrere Anbieter für Batterien speziell für Anwendungen auf Schiffen auch für große Kapazitäten [96], [97].

Kleine Installationen/Umrüstungen auf Sportbooten können ggf. auf Basis von Standardkomponenten und -Konfigurationen durch die Eigner selbst durchgeführt werden. Dies trifft vor allem bei kleinen Motorleistungen zu, für die vorkonfigurierte Systeme erworben werden können [98]. Schiffe mit hohem Kapazitätsbedarf und vor allem hoher benötigter Ladeleistung müssen aber von Fachleuten umgerüstet werden, da das Energiesystem schiffsspezifisch angepasst werden muss. Es existiert ein Beispiel, in dem eine Fähre in zwei Schritte vom dieselektrischen über hybrid auf batterieelektrischen Antrieb umgerüstet wurde [99].

Der Elektromotor an sich ist deutlich kleiner und leichter als ein Verbrennungsmotor gleicher Leistung und kann daher im Allgemeinen im Bauraum eines Verbrennungsmotors installiert werden. Der Elektromotor hat über den gesamten Drehzahlbereich ein hohes Drehmoment, sodass er das erforderliche Drehmoment zum Drehen des Propellers auch bei niedrigen Drehzahlen, wie sie für Schiffspropeller üblich sind, liefern kann. Dadurch kann ggf. sogar auf ein vorhandenes Untersetzungsgetriebe verzichtet werden. Der Elektromotor ist daher sowohl bezogen auf den verfügbaren Bauraum als auch die Drehmomentcharakteristik mit bestehenden Antriebssträngen kompatibel. Für den gleichen Energiegehalt ist eine Batterie deutlich schwerer und größer als ein Kraftstofftank. Die gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten unterscheiden sich etwa um den Faktor 100 bzw. 40. Durch die etwa doppelte Effizienz des Elektromotors

...gegenüber dem Verbrennungsmotor kann der Energievorrat für die gleiche Reichweite aber deutlich geringer ausfallen, sodass das diese Verhältnisse auf ca. 50 und 20 sinken. Insbesondere gleitfähige Boote sind aber Gewichtssensibel und ihre Leistung kann durch zu viel Zusatzmasse deutlich vermindert werden. Gleichzeitig benötigen sie aber für die Gleitfahrt verhältnismäßig hohe Leistungen und entsprechende Energievorräte. Wegen der höheren Verfügbarkeit von Strom gegenüber konventionellen Kraftstoffen kann der Energievorrat ggf. noch weiter, auf die für ein bis zwei Nutzungstage benötigte Energiemenge reduziert werden, wodurch die Nachteile weiter sinken und zumindest für Verdränger und Segelyachten akzeptabel werden. Nichtsdestotrotz benötigt die Installation der Batterien ein größeres Volumen als Kraftstofftanks, auch wenn durch den kleineren Motor zusätzliches Volumen verfügbar ist. Außerdem können Räume mit Schrägen oder runden Wänden, wie sie auf Schiffen und Booten häufig vorkommen, nicht so effizient genutzt werden wie für Kraftstofftanks. Weiterhin muss auf Schiffen die Massenverteilung beachtet werden, da sie Einfluss sowohl auf die Kenstabilität als auch auf die Hydrodynamik hat. Ein Vorteil der Batterie ist diesbezüglich, dass sie flexibler auf unterschiedliche Räume des Schiffes aufgeteilt werden kann [93], um die Masseverteilung zu optimieren, da sie nur durch Kabel und nicht durch Kraftstoffleitungen verbunden werden muss. Außerdem ändert sich Ihre Masse während der Fahrt nicht, was das Finden und Einstellen eines Optimums vereinfacht. Die benötigte Zeit zum Laden der Batterien kann für Berufsschiffe je nach Fahrplan kritisch sein. In einigen Anwendungen wie bei Fahren auf kürzeren Strecken kann ein Zwischenladen mit hoher Leistung während der Be- und Entladevorgänge ausreichen [74], um für die gesamte Betriebszeit genügend Energie zur Verfügung zu haben. Bei längeren Strecken und dementsprechend größeren Batteriekapazitäten können die Batterien aber nur während längerer Liegezeiten vollständig aufgeladen werden. Für Sportboote ist die Ladezeit weniger kritisch, da diese geringere Batteriekapazitäten benötigen und hauptsächlich tagsüber genutzt werden (siehe Abbildung 2-12) und dementsprechend über Nacht oder generell außerhalb der Nutzungszeiten geladen werden können. Dies ist momentan jedoch häufig durch Versicherungen untersagt. Ein Elektroantrieb schränkt die erreichbare Geschwindigkeit prinzipiell nicht ein. Das Fahren hoher Geschwindigkeiten geht aber zu Lasten der Reichweite, wovon insbesondere gleitfähige Boote und die Berufsschiffahrt betroffen sind. Für Segelyachten entsteht hieraus kein großer Nachteil, da der Motor der Hilfsantrieb ist. Für alle Cluster wurden bereits batterieelektrische Antriebe realisiert [99], [75], [76], [77].

4.1.2 Installations- Und Transformationskostenschätzung

Prinzipiell setzen sich die Kosten aus den Investitionskosten für die einzelnen Komponenten und den Kosten für die Installation zusammen. Für den batterieelektrischen Antrieb sind die beiden größten Komponenten der Motor und die Batterien. Die Kosten für einen Elektromotor betragen etwa 150 – 600€/kW (siehe Tabelle 3-7) und betragen daher nur etwa die Hälfte der Kosten für einen Verbrennungsmotor. Die Kosten für den Batteriespeicher liegen dagegen mit 170-600€/kWh um den Faktor 4500 höher als ein Dieseltank. Selbst bei Berücksichtigung der doppelten Effizienz des Elektromotors und der damit verbundenen Halbierung des Energiebedarfs gegenüber dem Verbrennungsmotor wären die Batterien noch immer um einen Faktor 2250 teurer. Zusätzliche Investitionskosten entstehen durch Peripherie wie etwa Ladegeräte.

Eine exakte Schätzung der Installations- und Transformationskosten ist relativ schwierig, da die Systemkonfiguration von vielen Faktoren wie Bootstyp, Bootsgröße und Verdrängung, individuelles Nutzungsprofil, verfügbare Infrastruktur, Möglichkeit für Eigenleistung etc. abhängt. Für eine erste Näherung wird daher angenommen, dass Boote im Durchschnitt mit einer Batteriekapazität ausreichend für eine Tagesdistanz entsprechend Kapitel 2.2.4 ausgerüstet werden und diese mit dem ermittelten Geschwindigkeitsprofil (siehe Abbildung 2-9) zurücklegen. Als installierte Leistung wird die für das Szenario Höchstgeschwindigkeit bestimmte Leistung angenommen, da die

Die Durchschnittsleistung gemäß des Fahrprofils zu gering wäre, um den oberen Geschwindigkeitsbereich des Profils zu erreichen. Damit ergeben sich die in Tabelle 4-1 aufgeführten Durchschnitts- und Percentilwerte für Batteriekapazität, installierte Leistung und die jeweiligen Kosten. Für die Bestimmung der Kosten wurde der jeweilige Mittelwert gemäß Tabelle 3-7 angesetzt. Je nach Bandbreite können die Kosten im Einzelfall stark abweichen. Die Tabelle verdeutlicht die große Variabilität der möglichen Investitionskosten, die durch unterschiedliche Schiffstypen- und Größen und individuelle Nutzung verursacht wird. Während die Gesamtinvestitionskosten im Durchschnitt 17791€ betragen, betragen sie für das 90. Percentil knapp das Zweieinhalbfache und für das 99. Percentil etwa das Fünfeinhalbfache.

Tabelle 4-1: Durchschnittswerte und Werte für 99. Und 90. Percentile der installierten Motorleistung und Batteriekapazität für Investitionskosten für Elektromotoren und Batterien pro Boot

	Durchschnitt	90. Percentil	99. Percentil
Motorleistung [kW]	32,3	83,46	204,97
Batteriekapazität [kWh]	14,75	30,85	58,34
CAPEX Motor [€]	12.113	31.298	76.864
CAPEX Batterie [€]	5.679	11.877	22.461
CAPEX [€]	17.791	43.175	99.325

Die Größenordnung der zusätzlichen Installationskosten können für Schiffe anhand von Beispielen geschätzt werden. Momentan lässt die Reederei Scandlines zwei Ihrer Fähren zu Plugin-Hybrid-Schiffen umbauen. Die installierte Kapazität von 5MWh soll aber für jeweils eine vollständig emissionsfreie Überfahrt ausreichen. Die Ladeinfrastruktur ist für ein Aufladen der Batterien auf 80% ihrer Kapazität in zwölf Minuten während des Ladevorgangs ausgelegt. Die Kosten betragen für das Projekt pro Schiff gut 15M€ [100]. Dies entspricht Kosten von etwa 3000€/kWh installierter Batteriekapazität. Ein weiteres Beispiel für eine Hybridisierung mit Batterien ist der Umbau zweier Warnowfähren. Dabei wurden insgesamt 900kWh verbaut bei einem Projektvolumen von etwa 3,1M€ [101]. Dies entspricht ca. 3444€/kWh an installierter Batteriekapazität. In dem Projekt wurden zusätzlich die Dieselgeneratoren ersetzt, sowie Maschinenfundamente, Außenhautkühlzellen und Medienversorgung sowie Abgasleitungen angepasst [101]. Setzt man die o.g. Kostensätze für Batterien in (siehe Tabelle 3-7) für beide Beispiele an, betragen die Investitionskosten in die Batterien ca. 12% des Projektvolumens.

Ein Beispiel für die Kostendifferenz für Neubauten mit batterieelektrischen Antrieben ist die Fähre Ellen, die in Dänemark verkehrt. Ihre Baukosten wurden auf 40% über den Kosten einer vergleichbaren, konventionell angetriebenen Fähre geschätzt. Ihre Betriebskosten sollen aber 75% niedriger liegen [99]. Außerdem würden die Kosten bei heutigen Batteriepreisen 20% niedriger liegen als zum Beginn des Projektes im Jahr 2015 [102], wodurch die Kostensteigerung effektiv nur noch 12% betragen würde. Für das vollelektrische Fahrgastschiff Future of the Fjords meldet Ship Technology, dass die Baukosten 60% über denen für das Vorgängerschiff lagen [22], wobei ein nicht unerheblicher Teil vermutlich auch auf den konsequenten Leichtbau mit Verbundwerkstoffen zurückgeführt werden kann. Sustainable Ships berichtet, dass das weltweit erste vollelektrische Containerschiff, Yara Birkeland, etwa das Dreifache eines konventionellen Schiffes für die gleiche Transportaufgabe gekostet hat [103], wobei dieser Wert mit Blick auf den Anspruch des Projektes ein vollständig autonomes Schiff zu bauen sicherlich nicht allein auf die Elektrifizierung zurückzuführen ist und somit als Ausreißer betrachtet werden kann.

4.1.3 Bewertungsmatrix

Die folgende Matrix fasst die oben beschriebenen Bewertungen für die vier unterschiedlichen Cluster zusammen.

Tabelle 4-2: Bewertungsmatrix batterieelektrischer Antrieb

Kriterien\Cluster	Berufsschiffahrt	Motorboote (Verdränger)	Motorboote (Gleiter)	Segelboote
Kraftstoffverfügbarkeit	++	++	++	++
Energiekosten	-54% (-45% *)	-54% (-45% *)	-54% (-45% *)	-54% (-45% *)
Verfügbarkeit	++	++	++	++
Umrüstbarkeit	o	o	o	+
Kompatibilität mit Antriebsstrang	++	++	++	++
Masse	o	o	--	o
Installationsgröße	-	o	-	o
Speicherzeit	-	+	o	+
erreichbare Geschwindigkeit	++	++	++	++
Reichweite	--	o	--	+

*bei Steuerbefreiung für fossile Kraftstoffe und Strom

4.2 Dekarbonisierungsalternative 2: Brennstoffzellenhybridantrieb

4.2.1 Bewertung des Antriebs

Der Brennstoffzellenhybridantrieb adressiert die Schwächen des batterieelektrischen Antriebs, indem er die Reichweite erhöht und Speicherzeit und Masse reduziert. Der Hybridantrieb kann ein um Komponenten eines Brennstoffzellensystems erweiterte Form des Elektroantriebs gesehen werden, weshalb einige Parallelen zwischen den Systemen bestehen. Das Ausgleichen der Nachteile hat allerdings den Preis, dass ausgeprägte Stärken des Elektroantriebs ggf. abgeschwächt werden und die Komplexität des Systems deutlich höher ist. Es müssen zwei Treibstoffe anstatt einem zugeführt werden, wobei die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff begrenzt ist. Der Energiekostenvorteil des batterieelektrischen Antriebs gegenüber Diesel kehrt sich in einen Nachteil um. Die Verfügbarkeit der Komponenten wird weiter als sehr gut eingeschätzt, da es auch für Brennstoffzellensysteme und vollständige Hybridsysteme bereits Anbieter in der maritimen Branche gibt [97], [104] und auf Erfahrungen und Entwicklungen aus dem Automobilbereich zurückgegriffen werden kann [105]. Durch die höhere Komplexität des Systems wird die Umrüstung schwieriger, da mehr Komponenten untergebracht und miteinander integriert werden müssen. Außerdem bestehen höhere Anforderungen an die Sicherheit beim Umgang mit Wasserstoff (siehe Tabelle 3-5). Daher müssen diese Installationen von Fachleuten durchgeführt werden, was insbesondere bei den Sportbooten die Kosten deutlich erhöhen wird.

Da ebenfalls Elektromotoren verwendet werden, wird auch für den Brennstoffzellenhybridantrieb die Kompatibilität mit dem bisherigen Antriebstrang durchweg als sehr gut eingeschätzt. Da die Masse der Batterien gegenüber dem Elektroantrieb reduziert wird und Wasserstoff eine sehr hohe gravimetrische Energiedichte hat, wird die Masse für die gleiche Energiemenge geringer ausfallen als beim reinen Elektroantrieb, was insbesondere für gleitfähige Sportboote relevant ist. Die Installationsgröße kann sich durch das verringerte Batterievolumen positiv entwickeln. Allerdings werden auch zusätzliche Komponenten und Leitungen benötigt, sodass insbesondere bei kleineren Installationen der Vorteil geringer ausfallen dürfte. Die Speicherzeit wird durch das Hybridsystem kürzer, da Wasserstoff schneller getankt werden kann. Davon profitieren aber nur die Boote und Schiffe, bei denen die Speicherzeit kritisch ist, d.h. insbesondere die Berufsschifffahrt. Die erreichbare Geschwindigkeit verändert sich nicht, allerdings wird die Reichweite merklich verbessert, da mehr Energie mitgeführt werden kann. In der Schifffahrt gibt es bereits mehrere Beispiele für Brennstoffzellenhybridsysteme. Diese sind jedoch hauptsächlich als Hilfsantrieb bzw. zur Energieoptimierung durch Peak Shaving ausgelegt und nicht als Hauptantrieb. Die Ergebnisse sind in der Bewertungsmatrix in Kapitel 4.2.3 zusammengefasst.

4.2.2 Installations- Und Transformationskostenschätzung

Zur Ermittlung der Installations- und Transformationskosten für die Sportboote wurde derselbe Ansatz wie für den batterieelektrischen Antrieb gewählt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Energie zu gleichen Teilen von der Batterie und der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt wird. Die Hälfte der benötigten Batteriekapazität wurde also durch einen Wasserstoffspeicher ersetzt, für dessen Dimensionierung die Effizienz der Brennstoffzelle von ca. 50% berücksichtigt werden muss, um die Reichweite konstant zu halten. Der Wasserstoffspeicher muss im Vergleich mit der Batterie also etwa den doppelten Energievorrat beinhalten. Zusätzlich wurde eine Brennstoffzelle mit einer Leistung in Höhe der halben Motorleistung angesetzt. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Gesamtkosten sind wegen der hohen Kosten für die Brennstoffzelle knapp doppelt so hoch wie für den reinen Elektroantrieb.

Tabelle 4-3: Durchschnittswerte und Werte für 99. und 90. Perzentile der installierten Motorleistung und Batteriekapazität für Investitionskosten für Elektromotoren, Batterien, Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher pro Boot

	Durchschnitt	90. Perzentil	99. Perzentil
Motorleistung [kW]	32,3	83,5	205,0
Batteriekapazität [kWh]	7,38	15,43	29,17
H ₂ -Speicherkapazität [kWh]	14,75	30,85	58,34
CAPEX Motor [€]	12.113	31.298	76.864
CAPEX Batterie [€]	2.839	5.939	11.230
CAPEX H ₂ -Speicher [€]	1.401	2.931	5.542
CAPEX PEMFC [€]	14.777	38.183	93.774
CAPEX [€]	31.130	78.350	187.410

Es gibt Beispiele für die Nutzung von Brennstoffzellen auf Schiffen und Booten in Hybridantriebsystemen [99] und mit reinem Wasserstoffantrieb [106], [107] und eine ganze

Reihe weiterer Projekte [108] rund um die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger auf Schiffen. Allerdings konnten keine Preisinformationen ermittelt werden, was ggf. darauf zurückgeführt werden kann, dass die Technik sich in der Pilotphase befindet und noch nicht sehr verbreitet ist. Auf Basis der Daten für die Sportboote kann aber mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Kosten höher als für einen batterieelektrischen Antrieb sind. Um zumindest eine grobe Schätzung zu ermitteln, werden die Kosten anhand des Beispiels der Fähre Ellen überschlagen. Die Kosten für Batterien liegen zwischen 170-600€/kWh und die Kosten für die Antriebsanlage bei 150-600€/kW (siehe Tabelle 3-7). Die Komponenten müssen für den kommerziellen Einsatz in maritimer Umgebung tauglich und zertifiziert sein, sodass von Kosten jeweils am oberen Ende der Bandbreite ausgegangen wird. Bei einem Preis von 500€/kWh und 500€/kW wären die Kosten der Antriebsanlage für die elektrische Fähre Ellen (4,3MWh, 2000kW) ca. 3,15M€, also etwa 18,5% der auf heutige Preise korrigierten Neubaukosten von 17,04M€ (80% von 21,3M€) [102]. Bei den Sportbooten sind die Investitionskosten für den Brennstoffzellenhybridantrieb etwa um den Faktor 2 höher als für den reinen Elektroantrieb (siehe Tabelle 4-1 und Tabelle 4-3). Überträgt man dieses Verhältnis auf die Großschifffahrt, betragen die Kosten für den Brennstoffzellenhybridantrieb in diesem Beispiel knapp 6,3M€ die Gesamtkosten 20,19M€. Die Zusatzkosten belaufen sich damit auf etwa 33%.

4.2.3 Bewertungsmatrix

Tabelle 4-4: Bewertungsmatrix Brennstoffzellenhybridantrieb

Kriterien\Cluster	Berufsschifffahrt	Motorboote (Verdränger)	Motorboote (Gleiter)	Segelboote
Kraftstoffverfügbarkeit	o	o	o	o
Energiekosten	+6% (+48% *)	+6% (+48% *)	+6% (+48% *)	+6% (+48% *)
Verfügbarkeit	++	++	++	++
Umrüstbarkeit	-	--	--	--
Kompatibilität mit Antriebsstrang	++	++	++	++
Masse	+	o	o	+
Installationsgröße	o	o	o	o
Speicherzeit	+	+	+	+
erreichbare Geschwin- digkeit	++	++	++	++
Reichweite	+	+	+	+

*bei Steuerbefreiung für fossile Kraftstoffe und Strom

4.3 Zusammenfassung AP3

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Beantwortung der folgenden Leitfragen:

1. Leitfrage 3: Abschätzung der Kosten für die Transformation der Schiffe und ihrer Antriebstechnik.
2. Leitfrage 4: Mehrkosten bei der Beschaffung neuer (gewerblicher) Schiffe.

Die durchschnittlichen Kosten für die Transformation der Sportboote und ihrer Antriebstechnik entsprechend **Leitfrage 3** wurden für den batterieelektrischen Antrieb auf 17791€ geschätzt. Allerdings können die Kosten im individuellen Fall auch leicht ein Vielfaches dieser Summe betragen und ggf. den Wert eines Bootes übersteigen, da die Systemkonfiguration stark von individuellen Umständen abhängt. Es wurde geschätzt, dass die Investitionskosten für 90% der Flotte unter 43175€ liegen und für 99% der Flotte 99325€ nicht übersteigen, wenn der Energiespeicher auf eine typische Tagesdistanz ausgelegt wird. Für die Variante des Brennstoffzellenhybridantriebs wurde ermittelt, dass die Kosten knapp das Zweifache des batterieelektrischen Antriebs betragen. Für die Berufsschifffahrt werden die Kosten für die Umrüstung anhand von Beispielen auf 3000-3444€/kWh installierter Batteriekapazität geschätzt.

Für die Mehrkosten bei der Beschaffung neuer gewerblicher Schiffe (**Leitfrage 4**) mit batterieelektrischem Antrieb, wurde anhand von Beispielen eine Bandbreite von 112-160% der Kosten eines konventionell angetriebenen Schiffes ermittelt. Für Fähren, die nach jeder bzw. jeder zweiten Überfahrt geladen werden können und damit geringere Energiespeicherkapazitäten benötigen, werden Werte am unteren Ende dieses Bereichs erwartet. Für Ausflugsschiffe, bei denen z.B. zusätzlich in besondere Leichtbaumaßnahmen investiert werden muss, um ein funktionierendes Gesamtkonzept zu erhalten, werden Werte am oberen Ende erwartet. Für den Brennstoffzellenhybridantrieb wurden Zusatzkosten anhand der Erkenntnisse zu den Sportbooten und eines Beispiels einer Autofähre im Bereich von 33% abgeschätzt. Da der Brennstoffzellenhybridantrieb die Nachteile der hohen Masse des Elektroantriebs kompensiert, verringern sich bei der Wahl dieses Antriebs die Leichtbauanforderungen, was je nach erforderlicher Reichweite einen Kostenvorteil gegenüber dem Elektroantrieb erzeugen kann.

5 AP4: Szenarioanalyse und Handlungsempfehlungen

Arbeitspaket 4 zeigt einen Realisierungspfad für die klimaneutrale Zukunft des Bodensees auf. Dazu werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den drei vorhergehenden Arbeitspaketen analysiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet, um einen Zeitplan aufzuzeigen, wie das Szenario „Klimaneutraler Bodensee“ bis 2040 erreicht werden kann. Die übergeordnete Kernempfehlungen sind die folgenden:

- Für die **Freizeitschifffahrt** am Bodensee bietet der batterieelektrische Antrieb die derzeit nachhaltigste und praktikabelste Lösung – emissionsfrei, leise und mit der vorhandenen Strominfrastruktur kompatibel.
- In der **Berufsschifffahrt** kann HVO kurzfristig den Betrieb bestehender Flotten klimafreundlicher gestalten, während batterieelektrische Systeme langfristig wirtschaftlicher und nachhaltiger sind.

Diese Empfehlung liegt darin begründet, dass die Kosten für Antriebe und Treibstoff im Fall von Wasserstoff deutlich höher sind, insbesondere auch im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen.

Methanol kann ebenfalls als klimaneutraler Kraftstoff eingesetzt werden, wird jedoch nicht empfohlen. Methanols großer Vorteil ist, dass existierende Infrastruktur genutzt werden kann. Die Klimaneutralität gilt für Methanol aber nur unter der Bedingung, dass es mit nachhaltiger Energie durch CO₂-Abscheidung und Elektrolyse erzeugt wird. Momentan gibt es weltweit nur eine Anlage dieser Art im industriellen Maßstab, weshalb die Verfügbarkeit als unzureichend eingestuft wird. Der Produktionsprozess benötigt außerdem erneuerbare Energie, die bei direkter Nutzung in batterieelektrischen Antrieben deutlich effizienter genutzt wird. Dadurch werden die Treibstoffkosten für Methanol immer über den Kosten elektrischer Energie liegen. Weiterhin ist Methanol kein Drop-In Treibstoff, d.h. Motoren müssen ausgetauscht oder umgerüstet werden. Entsprechende Motoren sind für Schiffe aber nicht für Sportboote verfügbar.

HVO kann als Übergangstechnologie eingesetzt werden, um sich mit bestehender Technik und geringem Aufwand dem Ziel der Klimaneutralität zu nähern. Wegen der limitierten Verfügbarkeit und der Tatsache, dass HVO die Treibhausgasemissionen um maximal 90% reduzieren kann, wird dieser Treibstoff nur als Übergangslösung für die Berufsschiffe empfohlen, da auch HVO schlussendlich ersetzt werden muss, um 100% Klimaneutralität zu erreichen. Bei den Sportbooten hingegen entfällt ein Großteil der Emissionen auf den 70%-Anteil der Boote, welche mit Benzinmotoren betrieben werden. Für einen Großteil der Sportboote ist HVO daher keine Option.

Elektromobilität ist für Sportboote hingegen bereits eine etablierte Technologie mit existierenden Neubau- als auch Retrofit-Optionen, wobei hier die Batteriekapazitäten finanziell und in Bezug auf Platzbedarf und Masse die größte Herausforderung darstellt. Im Bereich der Segelboote, wo 95% der Flotte bereits aktuell lediglich Maschinenleistungen von unter 21kW besitzen ist diese Umstellung am einfachsten mit wenig Veränderungsbedarf bei der Nutzung. Im Bereich der Motorboote ist es für ungefähr die Hälfte der Motorboote mit aktuellen Maschinenleistungen von unter 45kW kurz- bis mittelfristig vergleichsweise einfach, eine Elektrifizierung zu vollziehen. Im Segment der luxuriösen hochmotorisierten Yachten und Rennbooten ist bei klimaneutralen Elektrifizierungen von Bestandsbooten jedoch vermutlich ein stärker angepassten Nutzungsverhalten notwendig, wenn man die Umrüstkosten im hier dargestellten Rahmen halten möchte. Die Ausübung dieser vorrangig motorsportzentrierten Freizeitaktivität mit Hilfe von Verbrennungsmotoren ist aufgrund der dargelegten Abstinenz von klimaneutralen Drop-In-Alternativen mit dem Zielbild eines klimaneutralen Bodensees jedoch nicht vereinbar, sodass dort ein Veränderungsprozess zu begleiten ist.

„Aus Sicht von Politik und Administration besteht hier die Notwendigkeit zur Abwägung zwischen einem individuellen Freiheitsbedürfnis (insbesondere in der Freizeitschifffahrt) sowie dem Schutzbedürfnis des Bodensees in Bezug auf Umwelt und Emissionen. Das grundsätzliche Austarieren dieser beiden Bedürfnisse ist Kern der politischen Zielstellung. Um also das gemeinsame Ziel des „Klimaneutralen Bodensees“ zu erreichen, stehen Politik und Verwaltung drei grundlegende Handlungsoptionen zur Verfügung (inkl. Beispielen aus dem Automobilbereich):

- Marktsysteme zur Erzeugung eines Level-Playing Fields
 - o Anreizsysteme für klimaneutrale Antriebe (meist Förderprogramme, wie beispielsweise in Deutschland der Umweltbonus im Bereich der Automobilität oder über kostenlose Nutzung wie beispielsweise das kostenlose Laden in Norwegen zu Beginn der E-Mobilität)
 - o Kostensteigerung für klimaschädliche Antriebe (meist über Steuern und Gebühren, z.B. CO₂-Abgabe in Deutschland, CO₂-basierte KFZ-Steuer)
- Schaffung von attraktiven Rahmenbedingungen (z.B. das Deutschlandnetz für Schnellladestationen)
- Vorschriften und Regulatorik (z.B. die neue CO₂-Emissionsnorm der EU)

Auch wenn das Ziel prinzipiell durch alle Wege erreicht werden kann, so sprechen unterschiedliche Faktoren aus regulatorischer, sozialer, finanzieller oder öffentlicher Sicht für den einen oder anderen Weg. Bei geförderten Anreizsystemen ist beispielsweise ein öffentliches Interesse notwendig, um eine sparsame Mittelverwendung zu rechtfertigen und eine Finanzierung ist sicherzustellen. Im Fall des Bodensees ist dieses Interesse vermutlich eher im Bereich der (öffentlichen) Berufsschifffahrt zu finden als im privaten Freizeitsport. Bei Vorschriften und Regulatorik sowie steuerlichen Maßnahmen ist hingegen Sozialverträglichkeit und bei ersterem auch Bestandsschutz entscheidende Kriterien für die Akzeptanz dieser Maßnahme. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass nichtsdestotrotz eine Lenkungswirkung erzielt wird.

Die folgenden Handlungsempfehlungen stellen dabei aus Sicht der Autoren eine Auswahl realistischer Maßnahmen dar, es ist keine vollständige Darstellung aller möglichen Optionen. Aufgrund des unterschiedlichen öffentlichen Interesses unterscheiden sie sich zwischen der Sport- und der Berufsschifffahrt. Im Bereich der Sportbootschifffahrt werden vorrangig Maßnahmen zu Attraktivitätssteigerung der Rahmenbedingungen empfohlen, begleitet durch eine klare Regulatorikroadmap sowie eines Beitragssystems zur Kostendeckung. Für die Berufsschifffahrt steht hingegen ein starker Mix aus regulatorischen und Anreizsystemen im Fokus. Aktuelle Nutzungsmuster werden dabei möglichst nicht eingeschränkt, ganz vermeidbar sind Änderungsnotwendigkeiten jedoch nicht. In Summe haben die Handlungsempfehlungen jedoch das konkrete Ziel, spezifische Leitplanken für einen klaren, aber auch zeitlich-technisch realisierbaren und allgemein akzeptablen Weg hin zum klimaneutralen Bodensee zu setzen.

5.1 Handlungsempfehlungen Sportboote:

Die folgenden Handlungsempfehlungen werden für den Sportbootbereich gegeben:

5.1.1 Ladeinfrastruktur für Sportboote verfügbar machen und ausbauen

Batterieelektrische Antriebe werden einen wesentlichen Beitrag zur klimaneutralen Schifffahrt auf dem Bodensee leisten. Entsprechende Antriebslösungen sind verfügbar und stellen die momentan kostengünstigste Option für die Implementierung klimaneutraler Antriebe dar. Für ihre Nutzung muss aber eine entsprechende Ladeinfrastruktur vorhanden sein. CEE-Landstromanschlüsse sind bereits an vielen Liegeplätzen vorhanden, Wallboxen und Schnellladestationen müssen in den Marinas noch ausgebaut werden. Wie in Kapitel 3 dargelegt liegt der erwartete Investitionsaufwand diesbezüglich bei ca. 45 Mio € für 32.000 Liegeplätze am Bodensee. Für die Nutzung als Ladeinfrastruktur sind noch zusätzliche Hemmnisse abzubauen:

- a) **Abschaffen der Aufsichtspflicht** bei Nutzung von Landstromanschlüssen
In vielen Fällen dürfen CEE-Landstromanschlüsse aus Sicherheitsgründen nur bei Anwesenheit auf dem Boot genutzt werden. Die Ladevorgänge dauern je nach Batteriekapazität mehrere Stunden. Das Laden ist also mit langen Wartezeiten verbunden, die die Vorteile des Antriebs bei weitem überwiegen. Dieses Hemmnis muss beseitigt werden, um die Antriebsart attraktiv zu machen.
- b) **Überwindung technischer Hindernisse**
Es muss geprüft werden inwieweit vorhandene Landstromanschlüsse bezüglich der übertragbaren elektrischen Leistung für die Nutzung als Ladeinfrastruktur geeignet sind. Wegen der im Vergleich mit PKW langen Standzeiten und dem damit verbundenen geringeren Bedarf für schnelles Laden, dürften übliche Konfigurationen mit 230V und 16A (ca. 3,5 kW) in vielen Fällen ausreichen. So können über Nacht typischerweise innerhalb von 8 Stunden knapp 30 kWh geladen werden.
- c) Nachrüstung fehlender **Strom(zwischen)zähler**
Die Kosten für die Stromversorgung werden vielfach pauschal abgerechnet. Dementsprechend ist die Hafeninfrastruktur ggf. nicht mit Strom(zwischen)zählern für einzelne Liegeplätze ausgestattet. Diese müssen nachgerüstet werden, da eine pauschale Abrechnung wegen unterschiedlicher Batteriekapazitäten und Nutzungszeiten keine Akzeptanz finden wird.
- d) Installation von **Wallboxen und Schnellladesäulen**
Für große Batteriekapazitäten werden Ladepunkte mit höherer Leistung (Schnellladesäulen) benötigt. Der genaue Bedarf an diesen Systemen muss ermittelt und entsprechend nachgerüstet werden. Es sollte eine Detailprüfung der vorhandenen Netzkapazitäten durchgeführt werden, um eventuelle Netzausbaubedarfe und die damit verbundenen Kosten zu identifizieren. Nach der Ermittlung der benötigten Ladeleistung in Kapitel 3.3.3, entspricht der Richtwert für die maximal nötige Ladeleistung rund um den Bodensee je nach Szenario bis zu 50MW bzw. 80MW.

5.1.2 Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen für die Nutzung von klimaneutralen Antrieben am Bodensee (Klimabeitrag Bodensee).

Um das Ziel der Klimaneutralität bis z.B. 2040 zu erreichen, müssen knapp 2500 Bote jährlich ersetzt bzw. umgerüstet werden. Aktuell sind klimaneutrale Antriebe aber bei den Investitionskosten sowie der verfügbaren Infrastruktur gegenüber den konventionellen Antrieben im Nachteil. Im Zeitraum zwischen 2003 und 2024 erhöhte sich die Anzahl der Boote mit Elektroantrieb (dem bisher einzigem potenziell klimaneutralen

...Antrieb am Bodensee) um 1667, also nur um gut 83 Boote pro Jahr [109]. Diese Rate muss also deutlich gesteigert werden, wenn das gesetzte Ziel erreicht werden soll. Dieses Ziel sollte primär über eine Steigerung der Attraktivität klimaneutraler Antriebe erreicht werden, zum Beispiel den Ausbau der Infrastruktur. Nichtsdestotrotz müssen ggf. auch regulatorische Maßnahmen ergriffen werden, um das angestrebte Ziel zu erreichen. Daher werden die folgenden Maßnahmen empfohlen.

a) **Einführung „Klimabeitrag Bodensee“**

Die Einführung klimaneutraler Antriebe wird nur erfolgreich sein, wenn die entsprechende Ladeinfrastruktur geschaffen wird. Es ist zu befürchten, dass die dafür notwendigen Investitionen bei einer reinen Abhängigkeit von den Marktmechanismen zu träge sind. Daher wird die Einführung eines „Klimabeitrag Bodensee“ für Verbrennungsmotoren empfohlen, mit deren Erlös die notwendigen Kosten für die Ladeinfrastruktur (ca. 45 Mio €) finanziert bzw. gefördert werden können. Eine Bemessung des Beitrags an der installierten Primärantriebsleistung erscheint zweckmäßig. Um den administrativen Aufwand gering zu halten, sollte dieser parallel zur dreijährigen Zulassungsüberprüfung erhoben werden und zweckgebunden für den Ausbau der Infrastruktur verwendet werden. Dies kann über nationale Programme oder eine gemeinsame Stiftung geschehen. Klimaneutrale Antriebe wären von diesem Beitrag befreit, sodass es auch einen finanziellen Anreiz für Umrüstungspioniere gibt.

b) **Klimaneutrale Neuzulassung ab 2030**

Jedes Boot mit fossilem Antrieb, das neu zugelassen wird erhöht die notwendige Zulassungsrate für klimaneutrale Antriebe in den Folgejahren. Daher sollten deutlich vor dem Zielzeitpunkt nur noch Boote mit klimaneutralem Antrieb neu zugelassen werden.

c) **Beschränkte Bestandsschutzregelung nur bis 2037**

Wie oben erwähnt muss die Rate der Neuzulassungen und Umbauten von Booten mit klimaneutralem Antrieb deutlich gesteigert werden. Auch, wenn die nötige Rate ggf. übergangsweise über die Neuzulassungen erreicht werden kann, muss sichergestellt werden, dass zum Zielzeitpunkt alle Boote ersetzt bzw. umgerüstet sind. Daher muss der Bestandsschutz spätestens drei Jahre vor dem Zielzeitpunkt aufgehoben werden. Die Entscheidung sollte aber deutlich früher getroffen und kommuniziert werden, um den Bootseignern genügend Zeit zur Planung zu geben und auch einen plötzlichen Wertverlust der Boote zu vermeiden. Nach Motordefekt sollte analog zu den Neuzulassungen schon ab 2030 ein klimaneutraler Antrieb notwendig werden.

Bezüglich der Ausgestaltung des „Klimabeitrags Bodensee“ wird ein initialer Beitrag von 5€ je installiertem kW vorgeschlagen, welcher dann bei jeder weiteren Überprüfung verdoppelt wird. Unter Berücksichtigung der aktuell installierten Gesamtmotorleistung i.H.v. ca. 2,2 Mio kW sowie einer fortlaufenden Elektrifizierung der Flotte ergibt sich bis 2040 ein Beitragsvolumen von gut 65 Mio € für die Infrastrukturanpassungen im Sportbootbereich. Damit könnte – auch unter Berücksichtigung von bestimmten inflationsbedingten Anpassungen – die Infrastrukturanpassung finanziert werden.

Tabelle 5-1: Klimabeitrag Bodensee im Zeitverlauf und erwartet Beiträge für durchschnittliches Schiff sowie für jenes des 90. Und 99 Perzentils

	Beitrag für 3 Jahre	Anteil klima- neutrale Flot- te	Beitragsvolumen insgesamt	Ø 32 kW	90. Perc 83 kW	99. Perc 205 kW
Ab 2028	5 €/kW	0 %	11.162.068 €	161 €	417 €	1.024 €
Ab 2031	10 €/kW	25 %	16.743.103 €	323 €	834 €	2.049 €
Ab 2034	20 €/kW	50 %	22.324.137 €	646 €	1.669 €	4.099 €
Ab 2037	40 €/kW	70 %	26.788.965 €	1.292 €	3.338 €	8.198 €
			65.856.205 €	2.422 €	6.259 €	15.372 €

Der vorgeschlagene Beitrag bewegt sich aber insbesondere beim Durchschnittsschiff, wo sozialverträgliche Aspekte berücksichtigt werden müssen, in einem abbildbaren Rahmen. Ab 2028 sind es weniger als 5€/Monat, 2034 gut 18€/Monat, was bezogen auf weitere Schiffs- und Unterhaltskosten gering ist. Zum Vergleich: Um direkt eine Wettbewerbsgleichheit für Klimapioniere herzustellen, müsste der initiale Beitrag bereits bei 35€/kW liegen und auf 280€/kW steigen bei den in Kapitel 4 unterstellten Umrüstkosten. Im Fokus des „Klimabeitrags Bodensee“ steht daher nicht die kostentechnische Gleichbehandlung von klimaneutralen und traditionellen Antrieben, sondern die Schaffung einer Finanzierungsoption für die Infrastrukturanpassung, sowie eine gewisse Incentivierung von Klimapionieren erreichen.

5.1.3 Überprüfung der Notwendigkeit einer Rezertifizierung von Sportbooten nach Umbauten

Gemäß Artikel 19 Absatz 3 der Richtlinie 2013/53/EU muss für Sportboote ab Baujahr 1998 nach größeren Umbauten eine Begutachtung nach Bauausführung und damit eine Rezertifizierung durchgeführt werden [110]. Hier ist zu prüfen, ob bzw. wann der Austausch des Antriebssystems eine Rezertifizierung begründet. Falls ja, wird empfohlen gemeinsam mit den nationalen Zertifizierungsstellen einen möglichst vereinfachten, standardisierten Prozess zu entwickeln, um Aufwand und Kosten für diesen Schritt zu limitieren.

5.1.4 Untersuchung bidirektionales Laden und Regelleistungsbereitstellung

Die Kosten für eine Umrüstung der Antriebe sind nicht unerheblich und müssen in erster Linie durch Bootseigner und Hafenbetreiber getragen werden. Zur Refinanzierung könnte die Implementierung des bidirektionalen Ladens beitragen, bei dem die Akkus als Energiespeicher für die Stabilisierung des öffentlichen Stromnetzes genutzt werden (Regelleistungsbereitstellung). Wegen der im Vergleich mit PKW geringen Nutzungszeit erscheint dies eine ideale zusätzliche Nutzung der Boote am See, auch vor dem Hintergrund den Bodensee als Modellregion zu etablieren, da die klimaneutrale Schifffahrt am Bodensee so auch in andere Maßnahmen/Initiativen zur Treibhausgasreduzierung integriert werden könnte. Dazu gibt es aber mehrere Fragen zu klären:

a) Saisonalität

Die Sportboote liegen nur während der Sommersaison an ihren Liegeplätzen mit Landstromanschluss. Daher ist zu klären, inwieweit eine Nichtverfügbarkeit im Winter die geplante Nutzung als Energiespeicher beeinträchtigt und/oder ob die Batterien auch im Winter verfügbar sein können.

b) **Verträge & Abrechnungsmodelle**

Die Bootseigner beziehen ihren Strom über die Infrastruktur der Hafenbetreiber, häufig per Pauschalpreis. Es muss geklärt werden, wie Verträge und Abrechnungsmodelle für das bidirektionale Laden gestaltet werden können, damit sich eine Umsetzung sowohl für die Bootseigner als Batterieeigentümer als auch für die Hafenbetreiber als Infrastruktureigentümer lohnt.

In einem ersten Schritt wird empfohlen, diese Idee mit relevanten Netzbetreibern strategisch zu diskutieren und bei positivem Interesse im Rahmen einer Machbarkeitsstudie detaillierter zu untersuchen. Neben technischen Themen sollten dabei auch mögliche Anreizoptionen im Fokus stehen, wie die Bootseigner entweder laufend finanziell partizipieren oder bei der Speicherinvestition entlastet werden können um weitere Anreize für Klimapioniere zu schaffen.

5.1.5 Durchführen einer begleitenden Sensibilisierungskampagne

Insbesondere die regulatorischen Maßnahmen sollten frühzeitig angekündigt und klar kommuniziert werden. Dafür eignet sich eine begleitende Kampagne mit Informationsveranstaltungen für die unterschiedlichen Akteure und Zielgruppen am Bodensee, wie z.B. Sportbooteigner, Hafenbetreiber und Berufsschifffahrt.

5.2 Handlungsempfehlungen Berufsschifffahrt

Die folgenden Handlungsempfehlungen werden für die Berufsschifffahrt gegeben:

5.2.1 Umstieg auf HVO als Übergangstechnologie

Da die Fahrgastschiffe vollständig mit Diesel betrieben werden und einen Großteil der Emissionen verursachen, kann über die Umstellung auf zertifiziertes HVO kurzfristig eine große Emissionsreduktion erreicht werden. Diese Möglichkeit sollte für den Zeitraum der Vorbereitungen zur Einführung vollständig klimaneutraler Technologien genutzt werden. Der Umstieg sollte verpflichtend für alle Marktteilnehmer sein, um einen gleichen Wettbewerb zu ermöglichen, da die Treibstoffkosten für HVO gegenüber normalem Diesel etwas höher liegen.

5.2.2 Implementierung von batterieelektrischen Antrieben für die kommerzielle Schifffahrt

Wegen der Vorteile bei den Investitions- und Energiekosten gegenüber dem Brennstoffzellenhybridantrieb wird empfohlen auch die kommerzielle Schifffahrt so weit wie möglich mit batterieelektrischen Antrieben auszurüsten. Dies gilt nicht zuletzt auch wegen der möglichen Auswirkungen auf die Fahrgasttarife. Bei batterieelektrischen Antrieben sind die Energiekosten deutlich geringer als für Diesel. Je nach Auslastung und Anteil der Treibstoffkosten an den Betriebskosten, besteht daher die Möglichkeit, die zusätzlichen Investitionskosten für den Antrieb bei konstanten Fahrgasttarifen zu finanzieren. Die Kosten für Wasserstoff, Methanol und HVO sind höher als für Diesel, sodass die Fahrgasttarife bei deren Einsatz in jedem Fall steigen müssen. Für Brennstoffzellenhybridantriebe und Methanolmotoren müssten außerdem zusätzliche Investitionen finanziert werden.

Es gibt zwei Autofährverbindungen am Bodensee (Friedrichshafen <-> Romanshorn, ca. 12km & Meersburg <-> Konstanz, ca. 4,5km). Die Distanzen beider Fahrstrecken eignen sich für die Implementierung batterieelektrischer Fähren nach skandinavischem Vorbild mit Zwischenladen der Batterien nach jeder bzw. jeder zweiten Überquerung. Daher wird empfohlen dieses Prinzip auch am Bodensee zu implementieren. Für weite-

Die Berufsschiffe sollte eine mögliche Umsetzung inkl. begleitender Maßnahmen wie z.B. der Anpassung von Fahrplänen zum Schaffen von Ladefenstern, um potenzielle Ladeleistungs-Bedarfe zu reduzieren, überprüft werden. Dieser Schritt kann jeweils nur als Gesamtlösung inklusive der Ladeinfrastruktur umgesetzt werden.

5.2.3 Nutzung von Förderprogrammen für den Energieträgerwechsel in der Berufsschifffahrt.

Das Bundesministerium für Verkehr fördert über die Richtlinie zur Förderung emissionsfreier und emissionsarmer Antriebe sowie der nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen die Ausrüstung von Neubauten und Bestandsschiffen mit batterieelektrischen Antrieben, Brennstoffzellenantrieben sowie Brennstoffzellenhybridantrieben [111]. Diese oder ähnliche Förderungen sollten zur Modernisierung der Berufsschiffe am Bodensee genutzt werden.

In Österreich existiert mit der Sonderrichtlinie zur Förderung einer klima- und umweltfreundlichen Schifffahrt eine ähnliche Förderung des Bundesministeriums Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [112]. In der Schweiz gibt es ebenfalls ein entsprechendes Förderprogramm. Dieses ist jedoch auf Fahrzeuge im konzessionierten Verkehr beschränkt und hat nur eine geringe Förderquote [113].

5.3 Zeitpläne

5.3.1 Sportboote

Die empfohlenen Handlungen müssen zeitlich aufeinander abgestimmt sein, um das Ziel der klimaneutralen Bodenseeschifffahrt zu erreichen. Drei wichtige Aspekte, die zu Beginn bearbeitet werden müssen, um eine praktische Nutzung von Elektroantrieben durch Sportboote zu ermöglichen sind:

1. die Abschaffung der Aufsichtspflicht bei Nutzung von Landstromanschlüssen
2. die Überprüfung der Notwendigkeit der Rezertifizierung von Booten nach Umbauten
3. Untersuchung bidirektionales Laden und Regelleistungsbereitstellung.

Diese drei Punkte beeinflussen die weitere Umsetzung, da Sie einen erheblichen Einfluss auf die Nutzbarkeit der Landstromanschlüsse, die Umbaukosten und mögliche finanzielle Anreize durch einen Umbau haben.

Der Zeitplan für die weiteren Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur und Regulatorik als Kernbereiche der Transformation sind in Abbildung 5-1 dargestellt. Als Zeitpunkt der Zielerreichung wird das Jahr 2040 vorgeschlagen. Aus Infrastruktursicht sollte möglichst schnell damit begonnen werden die existierende Landstrominfrastruktur zu vereinheitlichen. Das Ziel sollte eine flächendeckende Versorgung mit liegeplatzspezifischen CEE-Steckdosen mit 16A-Sicherungen und Stromzählern sein, um batterieelektrische Antriebe zu einer realistischen Alternative zu machen. Sobald dieser initiale Standard erreicht ist (spätestens 2030), sollte die Neuzulassung von Verbrennungsmotoren beendet werden. Dies sollte auch für den Austausch defekter Motoren gelten, da in diesem Fall die Kosten für gleichwertigen Ersatz auf die Umrüstungskosten angerechnet werden können. Ab 2028 sollte der Klimabeitrag Bodensee erhoben werden, um größere Infrastrukturmaßnahmen zu finanzieren. Diese sollte zwischen 2030 und 2037 stufenweise angehoben werden, um die Kosten für den weiteren Infrastrukturausbau mit individuellen Wallboxen und öffentlichen Schnelladepunkten für den fortgeschrittenen Standard bis 2035 zu unterstützen. Die Zulassungsverlängerung von Bestandsbooten mit Verbrennungsmotor sollte spätestens 2037 beendet werden, damit entsprechende Zulassungen bis 2040 auslaufen.

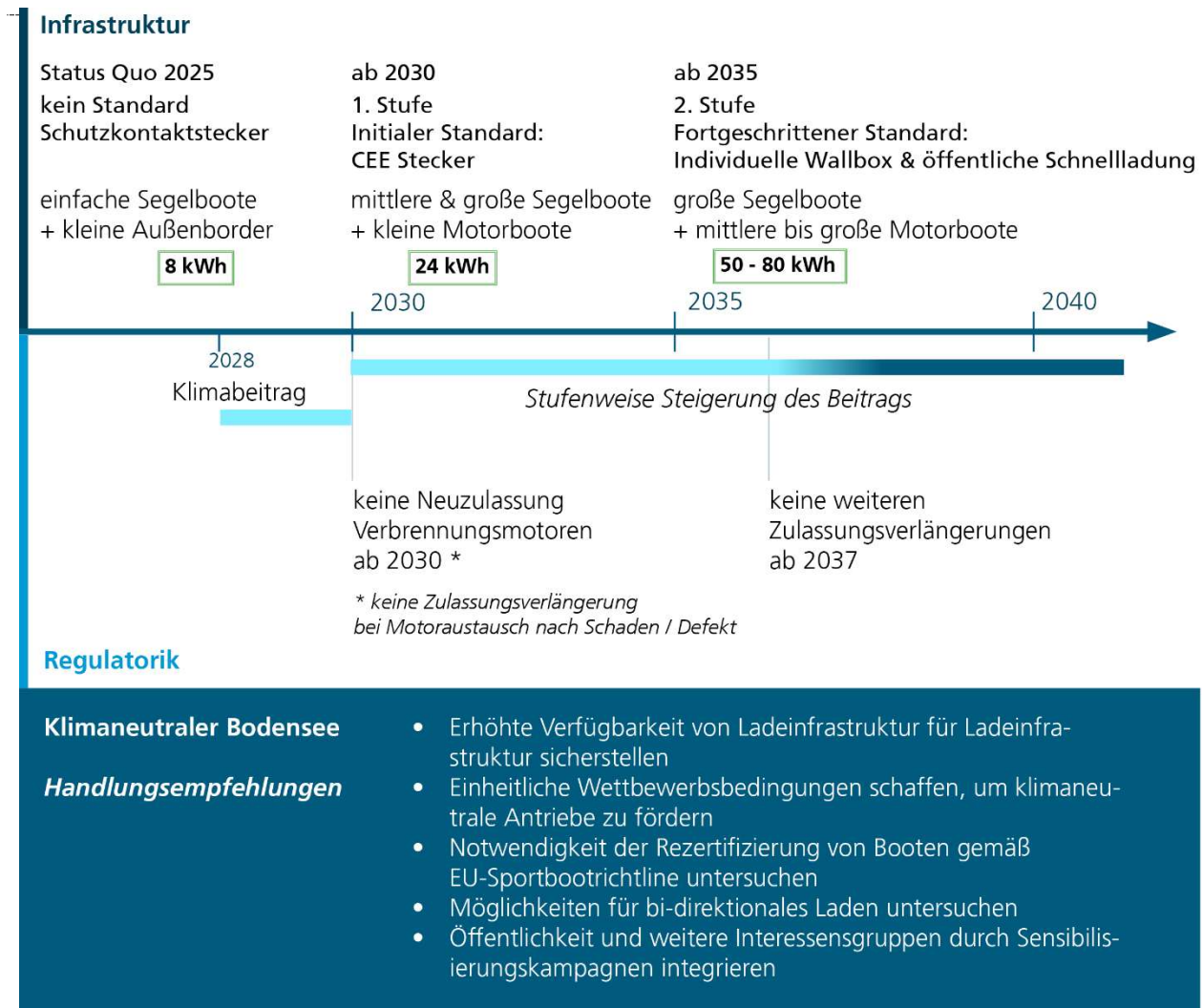


Abbildung 5-1: Zeitplan für Umsetzung der Handlungsempfehlungen für die Sportboote

Bei Umsetzung des Plans wird ein Verlauf der Emissionen gemäß Abbildung 5-2 erwartet. Die Emissionen sinken zu Beginn nur leicht. Mit zunehmender Verfügbarkeit größerer Ladeleistungen sinken die Emissionen immer stärker. In den letzten fünf Jahren erreicht die Emissionsreduktionsrate ihr Maximum bis die Emissionen schlussendlich auf null fallen.

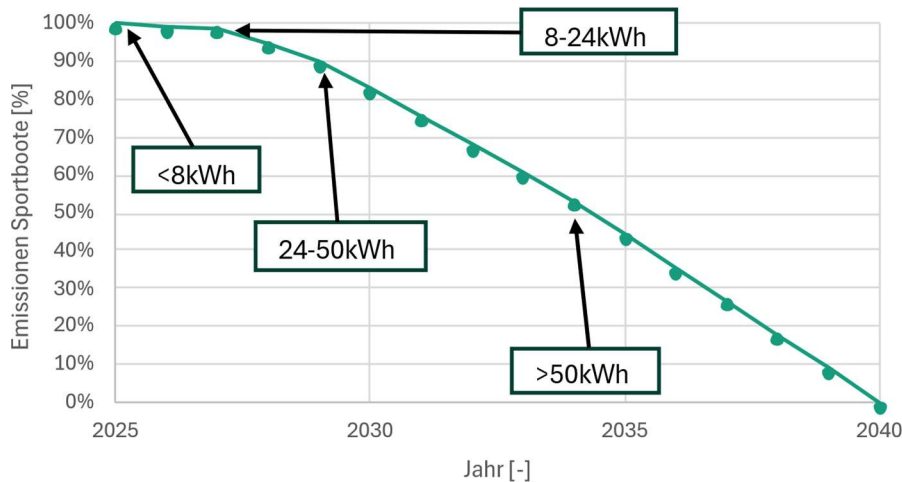


Abbildung 5-2: Erwarteter Verlauf der Emissionen bei Umsetzung des Plans für die Sportboote

5.3.2 Berufsschifffahrt

Parallel laufen die Maßnahmen für die Berufsschifffahrt. Der Zeitplan ist in Abbildung 5-3 dargestellt und beginnt mit einer Vorbereitungsphase bis Ende 2028. Inhalt dieser Phase sind der verpflichtende Umstieg auf HVO als Übergangstechnologie zur schnellen Senkung der Emissionen sowie die Priorisierung der Um- und Neubaumaßnahmen. Da die Berufsschifffahrt den größten Anteil an Treibstoffverbrauch und Emissionen hat und mehrheitlich mit Diesel betrieben wird, würde der verpflichtende Umstieg auf HVO die Emissionen signifikant reduzieren und ohne eine ungleichmäßige Belastung zu erzeugen. Für die Priorisierung sollte betrachtet werden welches Emissionsreduktionspotential durch Elektrifizierung einzelne Schiffe haben, und ob diese umgebaut oder ersetzt werden müssen. Weiterhin sollte geklärt werden welche Infrastruktur jeweils benötigt wird sowie welche Werftkapazitäten und Fördermöglichkeiten vorhanden sind.

Auf die Vorbereitungsphase folgt die Planungsphase, die bis Ende 2030 läuft und in der Schiffbau- und Infrastrukturmaßnahmen synchronisiert werden und die Detailplanungen für die ersten Umbau bzw. Neubaumaßnahmen von Schiffen und Infrastruktur gemäß Prioritätenliste durchgeführt werden.

Danach beginnt die Implementierungsphase, in der fortlaufend Schiffe umgebaut oder ersetzt werden und parallel die jeweilige Infrastruktur aufgebaut wird. Die Detailplanungen laufen dabei gemäß Prioritätenliste weiter, damit kein Leerlauf bei der Umsetzung entsteht.

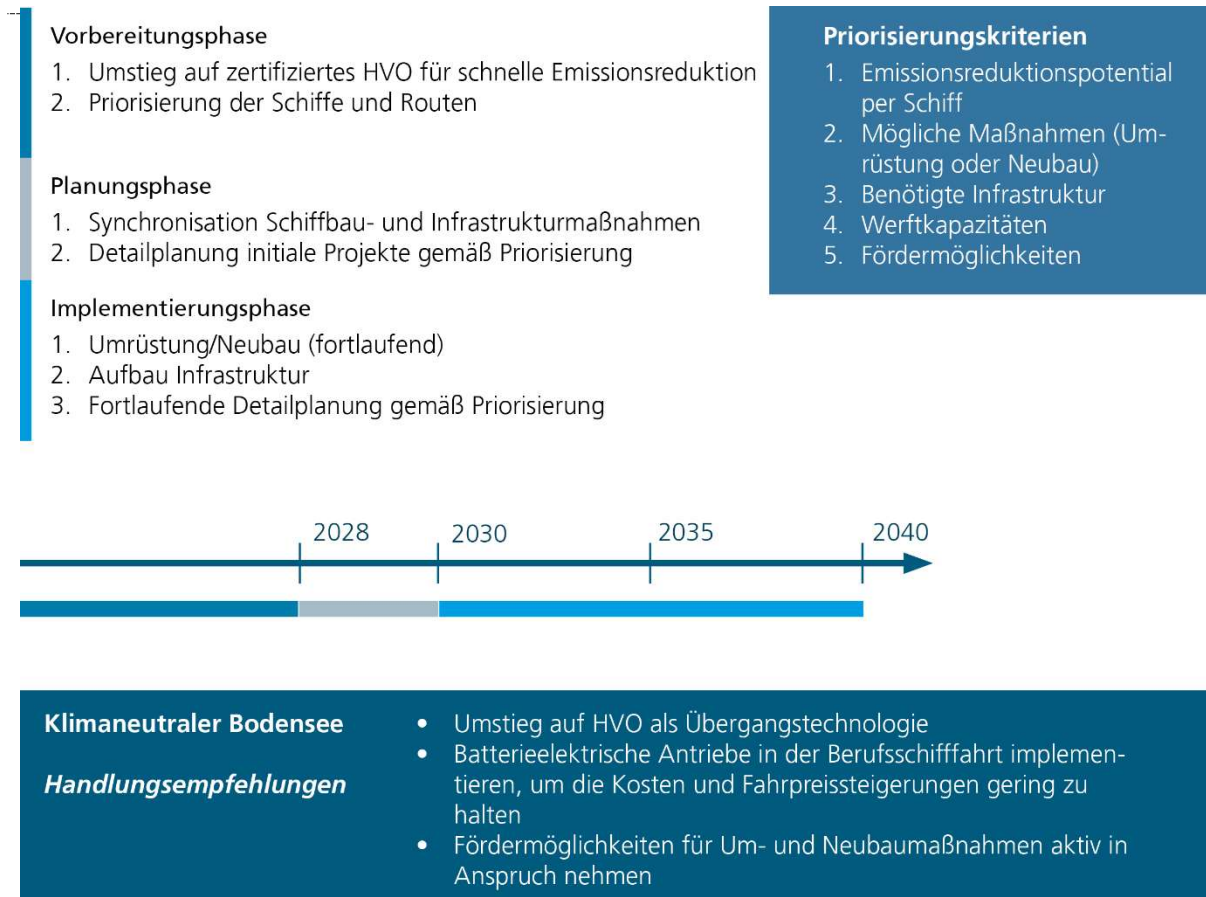


Abbildung 5-3: Zeitplan für Umsetzung der Handlungsempfehlungen für die Berufsschifffahrt

Abbildung 5-4 zeigt den erwarteten Verlauf der Emissionen für die Berufsschifffahrt. Im Gegensatz zu den Sportbooten sinken die Emissionen bei den Berufsschiffen durch die Umstellung auf HVO zu Beginn am stärksten, sind jedoch auch danach noch ca. viermal so hoch wie die Emissionen der Sportboote im Fahrprofilszenario. Während der Planungsphase stagnieren sie und nehmen am Ende nur langsam ab.

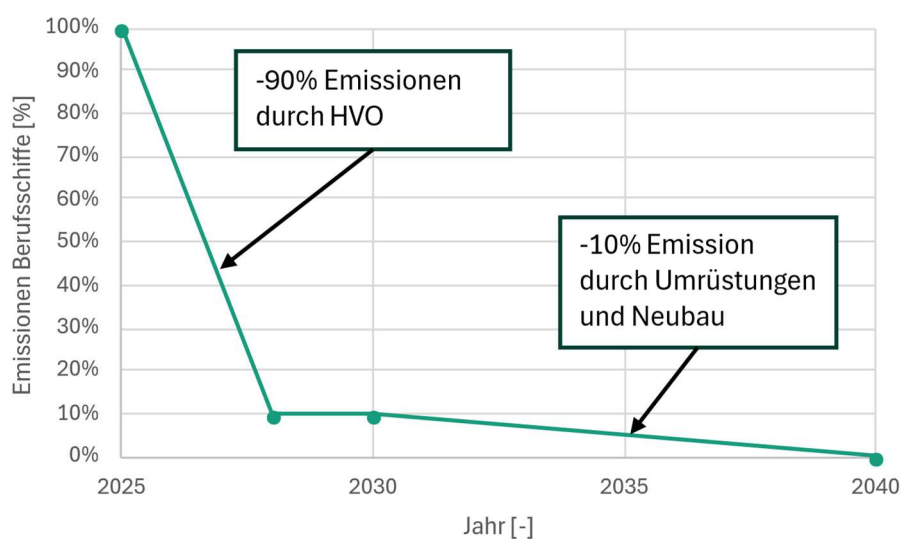


Abbildung 5-4: Erwarteter Verlauf der Emissionen bei Umsetzung des Plans für die Berufsschiffe

5.4 Zusammenfassung AP4:

In AP4 wurden insgesamt Handlungsempfehlungen formuliert, um das Ziel der klimaneutralen Bodenseeschifffahrt zu erreichen.

1. Die Ladeinfrastruktur muss für die Elektromobilität am Bodensee verfügbar gemacht und ausgebaut werden.
2. Es müssen gleiche Wettbewerbsbedingungen für die Nutzung klimaneutraler Antriebe am Bodensee geschaffen werden.
3. Die Notwendigkeit der Rezertifizierung von Booten nach größeren Umbauten gemäß EU-Sportbootrichtlinie sollte untersucht werden.
4. Die Berufsschifffahrt sollte HVO als Übergangstechnologie nutzen, um bereits vor der Einführung klimaneutraler Antriebstechnologien kurzfristig eine Emissionsreduktion zu erzielen.
5. Für die Berufsschifffahrt sollen so weit wie möglich ebenfalls batterieelektrische Antriebe implementiert werden, um die Kosten für Neubau/Umbau und Betrieb sowie Fahrpreissteigerungen zu minimieren.
6. Für Umbau- und Neubaumaßnahmen in der Berufsschifffahrt sollten öffentliche Förderprogramme genutzt werden.
7. Die Möglichkeit bidirektionales Laden für die Regelleistungsbereitstellung zu implementieren sollte untersucht werden.
8. Eine begleitende Sensibilisierungskampagne sollte durchgeführt werden, um die Öffentlichkeit und Interessengruppen am See einzubinden.

Es wurden Zeitpläne entworfen, die die zeitliche Abfolge der einzelnen Maßnahmen bis zu einem vorgeschlagenen Zielerreichungszeitpunkt 2040 definieren. Die Schwerpunkte des Plans für die Sportboote sind die Standardisierung der Ladeinfrastruktur in zwei Schritten mit CEE-Steckern bis 2030 und Wallboxen sowie öffentlichen Schnellladepunkten bis 2035. Damit synchronisiert endet die Neuzulassung von Verbrennungsmotoren im Jahr 2030 und der Bestandsschutz für bereits zugelassene Fahrzeuge spätestens 2037.

Der Plan für die Berufsschifffahrt enthält drei Phasen, die Vorbereitungsphase, die Planungsphase und die Implementierungsphase. Schwerpunkt dieses Plans ist die Priorisierung der Umbau- und Neubaumaßnahmen mit anschließendem kontinuierlichen Abarbeiten gemäß Priorität, um Leerlauf zu vermeiden.

6 Referenzen

- [1] Internationale Bodensee-Konferenz, *IBK-Positionspapier: Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt voranbringen: Beschluss im Strategiegespräch der IBK-Regierungschefs am 28. Juni 2024*. Accessed: Aug. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.bodenseekonferenz.org/bausteine.net/f/9809/IBK-PositionspapierKlimaneutraleBodenseeschifffahrt_2024-06-28.pdf?fd=0
- [2] W. Prof. Dr. Tillmetz, P. Boeger, and W. Hamann, "Klimaneutrale Schifffahrt auf dem Bodensee: Machbarkeitsstudie 2023," 2023. Accessed: Aug. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.bodenseekonferenz.org/bausteine.net/f/9696/MachbarkeitsstudieKlimaneutraleSchifffahrtBodensee_Dez2023.pdf?fd=0
- [3] International Maritime Organization IMO, *Resolution A.1106(29): Revised Guidelines for the onboard operational use of shipborne Automatic Identification Systems (AIS): A 29/Res.1106*, 2015. Accessed: Aug. 22, 2025. [Online]. Available: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/AIS/Resolution%20A.1106\(29\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/AIS/Resolution%20A.1106(29).pdf)
- [4] Varen doe je Samen! "Snelvaarkaart (2025)." Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.varendoejesamen.nl/kaarten/snelvaarkaart>
- [5] ORBCOMM. "AIS-Daten: Die umfassendste globale Abdeckung: Kombinieren Sie boden- und satellitengestützte AIS-Daten, um ein vollständiges Bild der weltweiten Schiffsaktivitäten zu erhalten." Accessed: Oct. 13, 2015. [Online]. Available: <https://www.orbcomm.com/de/solutions/maritime/ais-data>
- [6] D. Savitsky, "PLANING CRAFT," *Naval Engineers Journal*, vol. 97, no. 2, pp. 113–141, 1985, doi: 10.1111/j.1559-3584.1985.tb03397.x.
- [7] D. J. Kim and S. Y. Kim, "Turning characteristics of waterjet propelled planing boat at semi-planing speeds," *Ocean Engineering*, vol. 143, pp. 24–33, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.034.
- [8] Jan Holtrop, "A statistical re-analysis of resistance and propulsion data," *ISP*, vol. 31, pp. 272–276, 1984.
- [9] D. Savitsky, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls," *Marine Technology and SNAME News*, vol. 1, no. 04, pp. 71–95, 1964, doi: 10.5957/mt1.1964.1.4.71.
- [10] D. Blount and D. Fox, "Small-Craft Power Prediction," *Marine Technology*, vol. 13, pp. 14–45, 1976, doi: 10.5957/mt1.1976.13.1.14.
- [11] J. Bakker and P. van Vlaardingen, "Wetted surface area of recreational boats," 2017, doi: 10.21945/RIVM-2017-0116. Accessed: Sep. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0116.pdf>
- [12] T. Roberts, "Powerboat Design: Function and form, and their effects on performance," *WoodenBoat Magazine*, no. 137, pp. 76–89, 1997. [Online]. Available: <https://www.tadroberts.ca/about/pdf/power-boat-design-form-and-function.pdf>
- [13] "Basic Principles of Ship Propulsion," MAN Energy Solutions, Copenhagen, Denmark, Apr. 2023.
- [14] U.S. Department of Energy. "Where the Energy Goes: Electric Cars." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml>
- [15] U.S. Department of Energy. "Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>
- [16] "Informationsblatt CO2-Faktoren," Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [17] M. Heinzelmann, "Tankdaten Österreich und Schweiz", E-Mail, Oct. 2025.
- [18] Norled. "MF Ampere marks its 10th anniversary – a world first that started a green revolution." [Online]. Available: <https://www.norled.no/en/nyhet/mf-ampere-marks-its-10th-anniversary-a-world-first-that-started-a-green-revolution/>

- [19] R. Moore. "ForSea Ferries battery conversion: a 'big little journey': ForSea Ferries has led the way with battery conversions. Now its two retrofitted ferries have been in operation over a year, its chief executive reveals the challenges faced and achievements." [Online]. Available: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/forsea-ferries-battery-conversion-a-Isquotbig-little-journeysquo-57394>
- [20] Ferry Shipping Summit B.V. "ForSea's TYCHO BRAHE has been upgraded with the world's largest battery pack." [Online]. Available: [https://ferryshippingnews.com/forseas-tycho-brahe-has-been-upgraded-with-the-worlds-largest-battery-pack/#:~:text=October%2027%2C%202022,tons%20of%20CO2/year\)](https://ferryshippingnews.com/forseas-tycho-brahe-has-been-upgraded-with-the-worlds-largest-battery-pack/#:~:text=October%2027%2C%202022,tons%20of%20CO2/year))
- [21] Incat Tasmania Pty Ltd. "Incat Tasmania Secures Landmark Contract to Build World-Leading Electric Ferries for Denmark." [Online]. Available: <https://incat.com.au/incat-tasmania-secures-landmark-contract-to-build-world-leading-electric-ferries-for-denmark/>
- [22] GlobalData. "Future of the Fjords Sightseeing Vessel: Future of the Fjords is a new all-electric sightseeing vessel built by Brødrene Aa for Norwegian marine transportation company, The Fjords." [Online]. Available: <https://www.ship-technology.com/projects/future-of-the-fjords-sightseeing-vessel/?cf-view>
- [23] Norway's best. "Our Ships." [Online]. Available: https://www.norwaysbest.com/en/our-ships?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=paid_search&gad_source=1&gad_campaignid=1778397993&gbraid=OAAAAADoPjjWvYEt4-eAyKIY3JP2QB7_k&gclid=EAlalQobChMlwoiS7bqokAMV9qaDBx0dVQCSEAAYASAAEgJBtvD_BwE
- [24] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, "Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol?," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 55, pp. 28282–28297, 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.066. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319921022175>
- [25] R. Otsason, A. Laasma, Y. Gülmez, J. Kotta, and U. Tapaninen, "Comparative Analysis of the Alternative Energy: Case of Reducing GHG Emissions of Estonian Pilot Fleet," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, p. 305, 2025. doi: 10.3390/jmse13020305. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/2/305>
- [26] L. Bilgili, "Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 110985, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.110985. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403212100277X>
- [27] DNV, *ASSESSMENT OF SELECTED ALTERNATIVE FUELS AND TECHNOLOGIES*.
- [28] IEA. "Methanol: Fuel Information." Accessed: Sep. 29, 2025. [Online]. Available: https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/methanol
- [29] G. Amba Prasad Rao, K. J. Reddy, R. M. Reddy, K. Madhu Murthy, and G. Naga Srinivasulu, "Direct methanol fuel cells for automotive applications: a review," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 7349–7370, 2022, doi: 10.1080/01430750.2022.2063380.
- [30] F. Y. Al-Aboosi, M. M. El-Halwagi, M. Moore, and R. B. Nielsen, "Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry," *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 31, p. 100670, 2021. doi: 10.1016/j.coche.2021.100670. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211339821000022>
- [31] GESTIS, *Stoffdatenblatt-Ammoniak, wasserfrei*.
- [32] L. Sigrid Hammer, M. Leisner, W. Hans-Christian, Oyvind Endresen, Olav Tveit, and Magnus S. Eide, *Nordic Roadmap: Fuel Properties and their Consequences for Safety and Operability*.
- [33] J. A. Camargo and Á. Alonso, "Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment," *Environment International*, vol. 32, no. 6, pp. 831–849, 2006. doi:

- 10.1016/j.envint.2006.05.002. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412006000602>
- [34] G. Suter, S. Cormier, K. Schofield, M. Bowersox, and H. Latimer. "Ammonia." Accessed: Sep. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/caddis/ammonia>
- [35] C. Zamfirescu and I. Dincer, "Using ammonia as a sustainable fuel," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 459–465, 2008. doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.02.097. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775308004461>
- [36] D.-S. Kourkoumpas *et al.*, "Life cycle GHG emission reduction of hydrotreated vegetable oil integration in an industrial petroleum refinery," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 2, no. 2, p. 100076, 2024. doi: 10.1016/j.grets.2024.100076. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2949736124000034>
- [37] Deutsche Energieagentur, Ed., "Chancen und Risiken von HVO100 im Schwerlastverkehr: Factsheet," 2025.
- [38] IEA, "Global Hydrogen Review 2024," 2024. Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- [39] I. Y. Carlsson, *World's first commercial-scale e-methanol plant opens in Denmark*, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/worlds-first-commercial-scale-e-methanol-plant-opens-denmark-2025-05-13/>
- [40] Lerochem, Ed., "Methanol 99%, L," 2025. Accessed: Oct. 2, 2025. [Online]. Available: <https://lerochem.eu/de/paggrindinis/206-methanol-99-l.html>
- [41] ADAC. "Benzinpreis und Dieselpreis: So entstehen die Spritpreise aktuell." Accessed: Oct. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/7-fragen-zum-benzinpreis/#steuern-und-abgaben-auf-kraftstoff>
- [42] Deutsche Emissionshandelsstelle. "Nationalen Emissionshandel verstehen." Accessed: Oct. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.dehst.de/DE/Themen/nEHS/nEHS-verstehen/nehs-verstehen_node.html
- [43] Umweltbundesamt. "Der europäische Emissionshandel." [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel?utm_source=chatgpt.com#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels
- [44] I. Schrems, S. Fiedler, F. Zerzawy, and J. Hecker, *Einführung eines Emissionshandelsystems für Gebäude, Strassenverkehr und zusätzliche Sektoren in der EU: Übersicht zur Ausgestaltung des neuen EU-ETS2*.
- [45] Deutscher Bundestag, *Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 20. Februar 2023 eingegangenen Antworten der Bundesregierung*.
- [46] J. Perner, M. Unteutsch, and A. Lövenich, "Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe," 2018. Accessed: Oct. 2, 2025. [Online]. Available: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/die-zukuenftigen-kosten-strombasierter-synthetischer-brennstoffe>
- [47] S. Ankathi, Z. Lu, G. G. Zaimes, T. Hawkins, Y. Gan, and M. Wang, "Greenhouse gas emissions from the global transportation of crude oil: Current status and mitigation potential," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 26, no. 6, pp. 2045–2056, 2022. doi: 10.1111/jiec.13262. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13262>
- [48] W. Ramsay, E. Fridell, and M. Michan, "Maritime Energy Transition: Future Fuels and Future Emissions," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 22, no. 4, pp. 681–692, 2023. doi: 10.1007/s11804-023-00369-z. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/s11804-023-00369-z>
- [49] S. Lagouvardou, B. Lagemann, H. N. Psaraftis, E. Lindstad, and S. O. Erikstad, "Marginal abatement cost of alternative marine fuels and the role of market-based measures," *Nature Energy*, vol. 8, no. 11, pp. 1209–1220, 2023. doi:

- 10.1038/s41560-023-01334-4. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41560-023-01334-4>
- [50] H. Fehrenbach, T. Schlamp, N. Abdalla, and S. Köppen, "Klimabilanz von Biodiesel und HVO auf Basis von gebrauchtem Pflanzenöl (UCO)," 2025.
- [51] R. Suarez-Bertoa *et al.*, "Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation," *Fuel*, vol. 235, pp. 1427–1435, 2019. doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.031. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236118313929>
- [52] Umweltbundesamt. "CO₂-Emissionen pro Kilowattstunden Strom 2024 gesunken." Accessed: Sep. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2024>
#:~:text=Pro%20Kilowattstunde%20des%20in%20Deutschland,bei%20433%20Gramm%20pro%20Kilowattstunde.
- [53] t. Lauf, M. Memmler, and S. Schneider, *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2022*.
- [54] F. M. Kanchiralla, S. Brynolf, E. Malmgren, J. Hansson, and M. Grahn, "Life-Cycle Assessment and Costing of Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Shipping," *Environmental Science & Technology*, vol. 56, no. 17, pp. 12517–12531, 2022. doi: 10.1021/acs.est.2c03016. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c03016>
- [55] L. Law, B. Foscoli, E. Mastorakos, and S. Evans, "A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost," *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8502, 2021. doi: 10.3390/en14248502. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8502>
- [56] L. Sigrid Hammer and M. Leisner, *Safe Introduction of Alternative Fuels: Focus on ammonia and hydrogen as ship fuels*.
- [57] J. Anders Ryste *et al.*, *Comparison of Alternative Marine Fuels*.
- [58] IMO. "The State of Methanol as Marine Fuel 2023: A techno-economic assessment for the use of methanol as marine fuel." Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/methanol-marine-fuel>
- [59] N. Anner. "How dual-fuel conversions for two- and four-stroke engines prepare vessels to run on green methanol and ammonia." Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.man-es.com/discover/potential-dual-fuel-conversions>
- [60] A. K. Ådnanes, "Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion," Oslo, 2003.
- [61] T. Galimova, S. Lagouvardou, H. Kian, and C. Breyer, "Comparing sustainable fuel adoption in the energy transition for maritime and aviation transport," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 224, p. 116124, 2025. doi: 10.1016/j.rser.2025.116124. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403212500797X>
- [62] H. Fan *et al.*, "Two decades of hydrogen-powered ships (2000–2024): Evolution, challenges, and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 219, p. 115878, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115878.
- [63] H. Xing, C. Stuart, S. Spence, and H. Chen, "Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050," *Journal of Cleaner Production*, vol. 297, p. 126651, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126651. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621008714>
- [64] P. Karvounis, C. Tsoumpris, E. Boulougouris, and G. Theotokatos, "Recent advances in sustainable and safe marine engine operation with alternative fuels," *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 8, 2022. doi: 10.3389/fmech.2022.994942. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2022.994942/full>

- [65] M. Sterner and I. Stadler, *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. Accessed: Jul. 31, 2025. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-37380-0>
- [66] C. Dall'Armi, D. Pivetta, and R. Taccani, "Hybrid PEM Fuel Cell Power Plants Fuelled by Hydrogen for Improving Sustainability in Shipping: State of the Art and Review on Active Projects," *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 2022, 2023, doi: 10.3390/en16042022.
- [67] W. Cao, J. Zhang, and H. Li, "Batteries with high theoretical energy densities," *Energy Storage Materials*, vol. 26, pp. 46–55, 2020, doi: 10.1016/j.ensm.2019.12.024.
- [68] M. Hirscher, *Handbook of Hydrogen Storage*.
- [69] A. D. Korberg, S. Brynolf, M. Grahn, and I. R. Skov, "Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 142, p. 110861, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.110861. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121001556>
- [70] W. Zhang, J. Wang, G. Qin, S. Kuntal, F. Gong, and R. Yan, "Review of the state-of-the-art of alternative marine fuels: A viable approach to zero-carbon shipping," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 16, p. 100232, 2025. doi: 10.1016/j.clscn.2025.100232. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772390925000319>
- [71] L. Viktorsson, J. Heinonen, J. Skulason, and R. Unnthorsson, "A Step towards the Hydrogen Economy—A Life Cycle Cost Analysis of A Hydrogen Refueling Station," *Energies*, vol. 10, no. 6, p. 763, 2017, doi: 10.3390/en10060763.
- [72] C. C. Weiss. "Evoy raises the bar on world's most powerful electric outboard motor." Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://newatlas.com/marine/evoy-storm-most-powerful-electric-outboard/>
- [73] greenboatsolutions GmbH. "Torqeedo Deep Blue 100i 900 U/min." Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://greenboatsolutions.de/shop/motoren/innenborder/torqeedo-deep-blue-100i-900>
- [74] J. Adolf et al., *Energy of the future?: Sustainability mobility through fuel cells and H2*.
- [75] A. Rusin, K. Stolecka-Antczak, W. Kosman, and K. Rusin, "The Impact of the Configuration of a Hydrogen Refueling Station on Risk Level," *Energies*, vol. 17, no. 21, p. 5504, 2024, doi: 10.3390/en17215504.
- [76] K. Rusin, A. Rusin, K. Stolecka-Antczak, and W. Kosman, "Analysis of the impact of weather conditions on hazard zones considering a specific configuration of a hydrogen refuelling station," *Energy*, vol. 331, p. 137107, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137107.
- [77] J. LaChance, "Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 14, pp. 5838–5845, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.070.
- [78] H.-R. Gye, S.-K. Seo, Q.-V. Bach, D. Ha, and C.-J. Lee, "Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 2, pp. 1288–1298, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035.
- [79] E. A. Hussein and M. O. Waheed, "Fuel Station Monitoring and Automation based on WSN," *IJECE*, vol. 8, no. 5, p. 3647, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i5.pp3647-3656.
- [80] H. Wei, E. Müller-Casseres, C. R. P. Belchior, and A. Szklo, "Evaluating the Readiness of Ships and Ports to Bunker and Use Alternative Fuels: A Case Study from Brazil," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 10, p. 1856, 2023. doi: 10.3390/jmse11101856. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/10/1856>
- [81] T. Teske, A. Fitz, T. Schwedt, L. Baetcke, and S. Ehlers, "Electrifying inland waterway transport – a case study for Germany," *Ship Technology Research*, vol. 72,

- no. 2, pp. 132–145, 2025. doi: 10.1080/09377255.2025.2469396. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09377255.2025.2469396>
- [82] S. Brouzas, M. Zadeh, and B. Lagemann, "Essentials of hydrogen storage and power systems for green shipping," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 100, pp. 1543–1560, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.253.
- [83] APEX Group. "Erste Wasserstofftankstelle für Schwerlastfahrzeuge in Mecklenburg-Vorpommern geht in Betrieb." Accessed: Oct. 2, 2025. [Online]. Available: <https://h2.live/newsfeed/apex-erste-wasserstofftankstelle-fuer-schwerlastfahrzeuge-in-mecklenburg-vorpommern-geht-in-betrieb/>
- [84] J. Köhler and E. Graf. "Studie „Emissionsarme Antriebsarten auf dem Wasser – Zukunftsperspektiven“." [Online]. Available: https://www.vmwld.org/fileadmin/user_upload/VMWD/PDFs/BVWW_Studie_emissionsarme_Antriebe_v2.pdf
- [85] Elco Motor Yachts. "Electric Outboard Motors." [Online]. Available: <https://www.elcomotoryachts.com/product-category/electric-outboards/>
- [86] Mercury Marine. "AVATOR ELEKTRO-AUSSENBORDER: ELEKTROANTRIEB VON MERCURY." [Online]. Available: <https://www.mercurymarine.com/de/de/engines/electric/avator>
- [87] Torqeedo GmbH. "ELEKTRISCHE AUSSENBORDER FÜRS ABENTEUER." Accessed: Oct. 2, 2025. [Online]. Available: <https://www.torqeedo.com/de/outboards-prv.html>
- [88] DITOMA GmbH. "Produkte." [Online]. Available: <https://epropulsion.de/produkte/>
- [89] Evoy AS. "An E-volution for the electric boat market." [Online]. Available: <https://www.evoy.no/evoy-inboard-electric-boat-motor/>
- [90] VetusOnline.com ApS. "E-Line Elektrischer Antrieb." [Online]. Available: <https://vetusonline.de/german/catalog/category/view/s/e-line-electric-propulsion/id/918/>
- [91] Elco Motor Yachts. "Electric Inboard Motors." [Online]. Available: <https://www.elcomotoryachts.com/product-category/electric-inboards/>
- [92] Evoy AS. "A clean, connected & powerful electric outboard system." [Online]. Available: <https://www.evoy.no/evoy-outboard-electric-boat-motor/>
- [93] J. F. Hansen and F. Wendt, "History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends," *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2229–2242, 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.22458990.
- [94] H. Pestana, "Future trends of electrical propulsion and implications to ship design," *Proceedings of MARTECH 2014: 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering*, 2014. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/8a5534bd564a1431c1257d85003096e3/MARTECH_2014_Electrical_Propulsion_Henrique_Pestana_A.pdf
- [95] H. Pestana, "Future trends of electrical propulsion and implications to ship design," *Proceedings of MARTECH 2014: 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering*, 2014. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/8a5534bd564a1431c1257d85003096e3/MARTECH_2014_Electrical_Propulsion_Henrique_Pestana_A.pdf
- [96] Lehmann Marine GmbH. "Products." [Online]. Available: <https://www.lehmann-marine.com/products.html>
- [97] Corvus Energy. "Products." [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/products>
- [98] greenboatsolutions GmbH. "Produktfinder für den perfekten E-Antrieb." [Online]. Available: <https://greenboatsolutions.de/inputs>
- [99] F. Cherchi, M. Porru, and A. Serpi, "Electrification of Commercial Vessels: Pilot Projects and Open Issues," in *2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/VPPC53923.2021.9699224.
- [100] DVV Media Group GmbH. "Scandlines investiert mehr als 31 Mio. Euro in Fehmarnbelt-Fähren." [Online]. Available: <https://www.schiffundhafen.de/nachrichten/schiffbau/detail/scandlines-investiert-mehr-als-31-mio-euro-in-fehmarnbelt-fahren.html>

- [101] Weiße Flotte GmbH. "Hybridisierung zweier Warnowfähren: durch Modernisierungsmaßnahmen." [Online]. Available: <https://www.weisse-flotte.de/ausschreibung/hybridisierung-warnowfaehren>
- [102] A. Kortsari, "Ellen, the 100% electric ferry traveling in ranges never seen before," [Online]. Available: https://greenhysland.eu/wp-content/uploads/2022/10/2022-10-05_Decarbonisation-of-the-Maritime-Sector_Ellen-eFerry_compressed.pdf
- [103] Sustainable Ships. "Inside The World's First Electric Cargo Ship - Yara Birkeland." [Online]. Available: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2021/worlds-first-electric-cargo>
- [104] "Proteus® Maritime Fuel Cell Solutions: Purpose-built for maritime environments, Proteus' hydrogen fuel cell solutions offer clean, reliable, and efficient hydrogen power to drive the next generation of sustainable vessels." [Online]. Available: <https://proteus-energy.com/proteus-maritime-fuel-cell-solutions/>
- [105] Corvus Energy. "Pelican Marine Fuel Cell System: Inherently gas safe marine fuel cell system with proven fuel cell technology by Toyota." [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/products/corvus-pelican-marine-fuel-cell-system>
- [106] McConaghy Boats. "Chase Zero: McConaghy Boats in conjunction with Emirates Team New Zealand (ETNZ) are presenting options for the Hydrogen Chase Zero to meet the Protocol for the 37th America's Cup." [Online]. Available: <https://mcconaghyboats.com/yachts/chase-zero/>
- [107] B. Holtze. "World's first liquid-powered hydrogen ship, MF Hydra, is powered by Ballard's fuel cells: The world's first liquid-powered hydrogen ship, MF Hydra, is revolutionizing the maritime industry with Ballard's fuel cells." [Online]. Available: <https://blog.ballard.com/marine/worlds-first-liquid-powered-hydrogen-ship-mf-hydra-is-powered-by-ballards-fuel-cells>
- [108] I. Østvik, "MF Hydra - world's first LH 2 driven ship and the challenges ahead towards zero emission shipping," Dec. 2021. [Online]. Available: https://www.uib.no/sites/w3.uib.no/files/attachments/norled_mf_hydra_dec_2021.pdf
- [109] Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Maschinenbau und Elektrotechnik. "Bodensee-Schiff-Statistik: Stichtag: 31.12.2024." [Online]. Available: https://vorarlberg.at/documents/302033/689466/Bodensee-Schiff-Statistik_2024.pdf/d4781eeb-f2ad-5081-2f4b-f526cc01f565?t=1743088854770
- [110] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, *RICHTLINIE 2013/53/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. November 2013 über Sportboote und Wassermotorräder und zur Aufhebung der Richtlinie 94/25/EG*, 2013. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0053&qid=1566385353460&from=EN>
- [111] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, *Richtlinie zur Förderung emissionsfreier und emissionsarmer Antriebe sowie der nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen*, 2023. [Online]. Available: https://www.elwis.de/DE/Service/Foerderprogramme/Nachhaltige-Modernisierung-von-Binnenschiffen/Richtlinie-Antriebe.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [112] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, *Sonderrichtlinie zur Förderung einer klima- und umweltfreundlichen Schifffahrt*. [Online]. Available: https://www.bmimi.gv.at/dam/jcr:5ca5dc87-1647-401a-82b9-a471f3a9410d/SRL_Schifffahrt_BMK_20240620.pdf
- [113] Abteilung Finanzierung des BAV. "Richtlinie: finanzielle Förderung elektrischer Antriebstechnologien: Umsetzung des angepassten CO2-Gesetzes bei Bussen und Schiffen im konzessionierten Verkehr." [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/de/foerderung-von-elektrisch-betriebenen-bussen-und-schiffen>