An den Bundesverband für Wassersportwirtschaft e. V. (BVWW) und dem Deutschen Boots- und Schiffbauerverband e. V. (DBSV)

Studie „Emissionsarme Antriebsarten auf dem Wasser – Zukunftsperspektiven“

Jonathan Köhler, Etienne Graff

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
(Fraunhofer ISI)
Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe

Ansprechpartner:
Dr. Jonathan Köhler (Tel. +49 151 1474 2117,
j.koehler@isi.fraunhofer.de)

Projektleitung BVWW und DBSV:
Herr Karsten Stahlhut

Version 1.0 05.07.2025

Karlsruhe, 05.07.2025

Abstrakt:

In dieser Studie werden die Perspektiven für emissionsarme Antriebssysteme bei Sportbooten untersucht. Anhand von Literaturrecherchen und Interviews mit wichtigen Stakeholdern der deutschen Wassersportbranche werden die technischen, regulatorischen, wirtschaftlichen und politischen Aspekte der Transformation dieses Wirtschaftssektors beleuchtet. Die technischen Lösungen sind vielfältig: Elektroantrieb, Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe, die alle ihre eigenen Vor- und Nachteile haben. Diese Lösungen erfordern eine Infrastruktur, deren Aufbau je nach Art der Lösung mehr oder weniger kostenintensiv ist. Da der Wandel Aktuell ist, sind die Normen und Sicherheitssysteme der Technologie noch nicht vollständig entwickelt. Die Umsetzung kann sehr teuer sein, aber die Behörden bieten Entwicklungsprojekte oder sogar Kooperationen an, um diese Probleme zu lösen. Diese Forschungsergebnisse ermöglichen die Entwicklung konkreter Simulationen für die Vision von Marinas der Zukunft in drei spezifischen Gebieten.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary **7**

1. Einleitung **11**

2. Technische Aspekte der Thematik **15**

2.1. Antriebe 15
2.1.1. Elektroantriebe 15
2.1.2. Biokraftstoffe 20
2.1.3. Wasserstoffbasierte Kraftstoffe 23
2.1.4. Vergleich der Technologien in Bezug auf die Reichweite 28
2.1.5. Vergleich nach Wassersportsgebiete 33
2.2. Marinas 38
2.2.1. Lademöglichkeiten 38
2.2.2. Stromversorgung 41
2.2.3. Tankmöglichkeiten 42
2.2.4. Auswirkungen der neuen Technologien auf die Marinas und Charterbetreiber 45

3. Regulatorische Aspekte und Standards **51**

3.1. Antriebe 51
3.1.1. Sicherheitsaspekte 51
3.1.2. Standards bei Bootsbau 52
3.1.3. Versicherungsaspekte[10] 56
3.2. Marinas 57
3.2.1. Sicherheitsaspekte auf dem Wasser 57
3.2.2. Sicherheitsaspekte im Winterlager 59
3.2.3. Standards für Marinas 60
3.2.4. Versicherungsaspekte 64
3.2.5. Vertragsrecht für die Abrechnung und Stromaufnahme 65
3.2.6. Bedarf nach Schulung 66

4. Politische und wirtschaftliche Aspekte der Thematik 68

4.1. Wirtschaftliche Anforderung an Marinas 68

4.1.1. Gibt es eine Kundschaft für nachhaltige Boote? 68

4.1.2. Sind die Lösungen schon einsetzbar? 70

4.2. Politische Aspekte der Thematik 72

4.2.1. Wie kann man diese neuen Antriebe einsetzen 72

4.2.2. Förderprogramme für die Sportbootfahrtbranche 73

5. Visionen von Marinas der Zukunft 78

5.1. Annahme für Anwendungsfälle 78

5.2. Binnenbereich 80

5.3. Bodenseebereich 84

5.4. Nord/Ostseebereich und Kiel Kanal 87

6. Fazit 90

7. Literaturverzeichnis 93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Emissionen von Kohlendioxid nach Kategorien in Deutschland 11
Abbildung 2: Anteil der deutschen Verkehrsemissionen 12
Abbildung 3: gesamter Elektroantrieb 16
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines E-Boots mit POD-Antrieben 17
Abbildung 5: Beispiele von Elektromotoren für Boote 18
Abbildung 6: Herstellung von Biodiesel 21
Abbildung 7: volumetrische Energiedichte von alternativen Kraftstoffen 22
Abbildung 8: Vergleich von verschiedenen Kraftstoffeigenschaften 23
Abbildung 9: Wasserstoffproduktionsverfahren 24
Abbildung 10: Kraftstoffverbrennungskennwerte 25
Abbildung 11: Volumetrischer Heizwert von Kraftstoffen 25
Abbildung 12: E-Fuel Herstellung 26
Abbildung 13: Szenarien über E-Fuels Produktion 27
Abbildung 14: Eigenschaften von verschiedene Elektroboote 28
Abbildung 15: Reichweiten für verschiedene Boote (im km) 28
Abbildung 16: verschiedene Antriebsmöglichkeiten 29
Abbildung 17: Vergleich der Reichweite je nach Antriebsart 30
Abbildung 18: Merkmale Daten über E-Boote 31
Abbildung 19: Kapazität nach Leistung für E-Booten 31
Abbildung 20: Reichweite von E-Booten (in Klammern steht die Messgeschwindigkeit in km/h) 32
Abbildung 21: Bewertung der Eigenschaften von Segelbooten nach Antriebsarten 35
Abbildung 22: Bewertung der Eigenschaften von kleinen Booten nach Antriebsarten 36
Abbildung 23: Bewertung der Eigenschaften von Motorbooten nach Antriebsarten 36
Abbildung 24: Die Einbindung von Technologien nach Booten und Gebieten 37
Abbildung 25: Schema einer Schnelladesäule 39
Abbildung 26: Relative Speicherdichten im Vergleich zu Diesel 43
Abbildung 27: Reine und Systemische Energiedichte für Kraftstoffe 44
Abbildung 28: Vergleich von Energiepreisen 44
Abbildung 29: Kriterien für Binnenwasser-Gebiete nach Antriebsarten 46
Abbildung 30: Kriterien für Bodensee-Gebiete nach Antriebsarten 47
Abbildung 31: Kriterien für Nord- Ostsee-Gebiete nach Antriebsarten 49
Abbildung 32: Vergleich von Zahlungsmethoden 66
Abbildung 33: Use-Case Marina-Kanal 20 Liegeplätze 81
Abbildung 34: Vision einer Marina am Kanal mit 20 Liegeplätze 81
Abbildung 35: Use-Case Marina-Kanal 150 Liegeplätze 82
Abbildung 36: Vision einer Marina am Kanal mit 150 Liegeplätze 83
Abbildung 37: Use-Case Marina-Bodensee 1400 Liegeplätze 85
Abbildung 38: Vision einer Marina am Bodensee mit 1400 Liegeplätze 86
Abbildung 39: Use-Case Marina-Nord/Ostsee 1400 Liegeplätze 88
Abbildung 40: Vision einer Marina am Nord/Ostsee mit 1400 Liegeplätze 89

Abkürzungsverzeichnis

AC/DC: Alternative Current/Direct Current (Wechselstrom/Gleichstrom)

AWI: Alfred-Wegener-Institut

B20-50-100: Bioethanol (mit Prozent)

BEVs: Battery Electric Vehicles (Batterie-Elektrofahrzeug)

BMS: Battery Management System

BVWW: Bundesverband Wassersportwirtschaft

CCS: Carbon Capture and Storage (Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)

CCU: Carbon Capture and Utilization (Kohlenstoffabscheidung und -verwendung)

CE: EU-Konformitätserklärung

CFCs: Chlorofluorocarbons (Chlorfluorkohlenstoffe)

CO2: Kohlendioxyd

DBSV: Deutsche Boots- und Schiffbauerverband

DIN: Deutsche Institut für Normung

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle)

EU: Europäische Union

FDIS: Final Draft International Standard

FuE: Forschung und Entwicklung

GFK-CFK: Glasfaserverstärkter Kunststoff - Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Gl: Gleiter

HCDCs: Hydrochlorofluorocarbons (Fluorchlorkohlenwasserstoffe)

HVO: Hydrotreated Vegetable Oils (Hydriertes Pflanzenöl

IEC: International Electrotechnical Commission

IMO: International Maritime Organisation

ISO: International Organization for Standardization

LKW: Lastkraftwagen

LNG: Liquefied Natural Gas (Flüssigerdgas)

LP: Liegeplatz

MY: Motoryacht

NCE: Normenausschuss für elektrische Ausrüstungen von Wasserfahrzeugen

OM: Offene Motorboot

PKW: Personenkraftwagen

RCD: Residual Current Device (Fehlerstromschutzschalter)

RFID-Karte: Radio-Frequency Identification (Identifizierung mit elektromagnetischem Wellen)

SY: Segelyacht

TFB: Tragflächenboot

TÜV: Technischer Überwachungsverein

VDE: Verband der Elektrotechnik

VMWD: Verband Maritime Wirtschaft Deutschland

Executive Summary

Die Klimaziele der EU fordern bis 2050 eine weitgehende Dekarbonisierung aller Wirtschaftsbereiche – auch der Sportbootbranche. Obwohl diese nur einen kleinen Teil der gesamten Verkehrsemissionen ausmacht, ist sie Teil einer größeren Mobilitätswende. In Deutschland wächst das Bewusstsein für die Notwendigkeit umweltfreundlicher Antriebe auch im Freizeitbereich. Elektrifizierung, alternative Kraftstoffe wie HVO und E-Fuels sowie die Anpassung von Marinas an neue Energieinfrastrukturen spielen hierbei zentrale Rollen.

Es gibt in viele Gebiete keine Regulierung, die die Dekarbonisierung von Sportbooten fordert. Eine Ausnahme ist der Bodensee. Daher ist die Nachfrage von alternativen Antrieben sehr klein und ein Business Case für die Investition in der Infrastruktur ist nicht vorhanden. Trotzdem ist es vorhersehbar, dass in den kommenden 5 bis 10 Jahren die Nachfrage wächst und Regulierungen für Dekarbonisierung eingeführt werden.

Überblick zu den Booten

Die Sportbootbranche ist geprägt durch eine große Vielfalt: Segelboote, Jollen, Motorboote und Yachten mit sehr unterschiedlichen Nutzungsprofilen.

Elektrische Antriebe bieten Vorteile wie Lautlosigkeit, geringe Wartung und lokal emissionsfreies Fahren und sind verbessern die Manövrierfähigkeit. Nachteile wie hohe Kosten und geringe Reichweiten begrenzen aber vor allem bei größeren Booten und im maritimen Bereich die Einsatzmöglichkeiten. Dagegen scheint die Elektrifizierung in Binnengewässern (mit begrenzter Geschwindigkeit), bei kleinen und mittelgroßen Segelbooten, die ihren Motor nur zum Manövrieren, Ein- und Auslaufen in den Hafen nutzen, sowie bei kleinen Motorbooten, die nur für ein paar Stunden auslaufen, eine bessere Lösung zu sein.

Alternativen wie Biokraftstoffe (HVO) oder synthetische E-Fuels können in bestehenden Verbrennungsmotoren genutzt werden. Sie ermöglichen eine Reichweite, die der eines herkömmlichen Diesels nahekommt. Bei synthetischen Kraftstoffen bleiben jedoch die lokalen Emissionen bestehen, ebenso wie die Unannehmlichkeiten, die mit Lärm und Schwingungen des Motors verbunden sind. Diese Lösungen könnten das Problem der Reichweite lösen, insbesondere für große Boote und solche, die lange Strecken zurücklegen müssen. Nachteile sind die hohen Kosten der Kraftstoffe und vor allem der begrenzten Verfügbarkeit von E-Fuels.

Es gibt inzwischen mehrere Segelyachten mit einer Option für E-Antrieb und E-Boote Designs. Trotzdem ist der Marktnachfrage noch sehr gering, was eine große Barriere für die Investition in der notwendigen Infrastruktur in Marinas darstellt.

Marinas der Zukunft

Ladestruktur und Stromversorgung

Die Umstellung auf E-Mobilität erfordert große Investitionen in Ladeinfrastruktur. Viele Marinas verfügen bisher nur über 220V/16A-Anschlüsse – ausreichend für langsames Laden über Nacht, aber ungeeignet für schnelle Umläufe bei Charterbetrieben oder Schnellbooten. Schnellladesäulen mit 50–400 kW wären technisch möglich, sind aber teuer (40.000–100.000 €) und erfordern leistungsfähige Stromnetze.

Zusätzliche Herausforderungen:

- Es muss ein Netz von Ladestationen geschafft werden
- Platzmangel in voll besetzte Marinas
- Sicherheitsanforderungen (Feuchtigkeit, Salzwasser, Erdung)
- Hoher Energiebedarf – insbesondere in der Hochsaison
- Fehlende technische Standards und Abrechnungssysteme
- Fehlende Gesetze für Dekarbonisierung, fehlende Förderung der Infrastrukturinvestition

Ein Lösungsweg ist die Integration von Ladepontons oder Kooperationen mit privaten Anbietern, die Ladesäulen im Abo-Modell betreiben und betreuen. Diese Methode wird vor allem in Südfrankreich angewandt.

Energiequellen und Netzkapazitäten

Marinas sind meist nicht an Hochspannungsnetze angebunden. Um den steigenden Bedarf zu decken, wären Stromspeicher (Batteriesysteme) sowie lokale Erzeugung (z. B. Photovoltaik) sinnvoll. Intelligente Lastmanagementsysteme (z. B. priorisiertes Laden je nach Bootstyp) könnten zusätzlich helfen, Lastspitzen zu vermeiden.

Tanken alternativer Kraftstoffe

Während E-Boote primär auf Strom angewiesen sind, ist auch eine Infrastruktur für Biokraftstoffe oder E-Fuels erforderlich. Besonders HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)

kann heute schon eingesetzt werden, da es mit bestehenden Dieselmotoren kompatibel ist. Wasserstoff oder Ammoniak sind dagegen wegen hoher Lager- und Sicherheitsanforderungen kaum realistisch in der Breite einsetzbar.

Biokraftstoffe und vor allem FAME (Fatty Acid Methyl Ester) haben eine geringere mögliche Lagerdauer als herkömmlicher Diesel. Daher ist es wichtig, seinen Kraftstoff regelmäßig (jeden Monat) zu testen, um das Wachstum von Bakterien zu verhindern, die einen Teil des Kraftstoffs in Wasser umwandeln. Dieses Wasser verursacht Schaden, wenn es in einem Verbrennungsmotor unter Druck gesetzt wird.

Regionale Unterschiede

- **Binnengewässer**: Kurze Distanzen, niedrige Geschwindigkeiten → perfekte Umgebung für E-Boote. CEE-Ladeinfrastrukturen (230V-16A) reichen oft aus.

- **Bodensee**: Fortschrittlich, erste Marinas bieten schon HVO an. Elektromobilität für Segel- und kleine Motorboote sinnvoll, Schnellladung für Wassersport denkbar. Doppel-Ladesäule für Auto und Boote wäre eine Möglichkeit, eine Nachfrage für Hochleistungslandstromanschlüsse zu antreiben.

- **Nord-/Ostsee**: Lange Distanzen, wechselhaftes Wetter macht Batterieelektrische Antriebe schwer umsetzbar. Fokus auf alternative Kraftstoffe für Motoryachten, **Elektrifizierung** nur bei Segelbooten realistisch.

Gesetze und Standards

Viele technische Normen befinden sich noch in Entwicklung. Ohne klare Zertifizierungen und Sicherheitsvorschriften (z. B. Brandschutz bei Batterien, Ladetechnik im Wasser) können Investitionen riskant sein. Versicherer fordern zunehmend detaillierte Nachweise und Sicherheitskonzepte.

Maßnahmen für Marinas

- Schritt für Schritt angehen, durch z.B. Pilotprojekte mit Ländern und Industrie, womöglich mit Anbieter aus der PKW/LKW Bereich.
- Mit andere Marinas und öffentliche Häfen kooperieren, um Strom- und Tanknetze zu schaffen.
- Normen für die Lagerung von E-Booten an Land (Winterlager) soll entwickelt werden.

- Standardisierte Bezahlung per Kreditkarte oder Apps entwickeln

Fazit

Marinas spielen eine Schlüsselrolle bei der nachhaltigen Transformation der Freizeit-Schifffahrt. Sie müssen flexibel, technologieoffen und regionalspezifisch in Lade- und Tankinfrastruktur investieren – idealerweise unterstützt durch Förderprogramme und klare gesetzliche Rahmenbedingungen. Nur durch abgestimmte Planung zwischen Bootsbauern, Marina-Betreibern, Politik und Charterer/Kunden kann eine emissionsarme und zukunftssichere Bootsbranche entstehen.

Die Industrie muss Schritt für Schritt vorgehen. Zusammen mit den Standards wird sich auch die Nachfrage ausweiten und die Yachthäfen müssen sich anpassen. Unsere Empfehlung ist: die Zukunft voraussehen und mit der Installation von Ladeinfrastruktur beginnen, um die Nachfrage zu befriedigen und die Investitionen zeitlich zu strecken.

1. Einleitung

Die anthropogenen Umweltauswirkungen sind heute unumkehrbar. Bereits jetzt sind die Folgen dauerhaft spürbar, und erste Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels wurden eingeleitet. Die Europäische Union verfolgt mit ihrer langfristigen Strategie für den Zeithorizont 2050 das ehrgeizige Ziel der Kohlenstoffneutralität. Allerdings erscheint dieses Ziel auf den ersten Blick noch in weiter Ferne. Eine Vielzahl von Wirtschaftssektoren ist nach wie vor in hohem Maße von fossilen Energieträgern abhängig und muss umfassend dekarbonisiert werden, um die Klimaziele des Pariser Abkommens zu erreichen.

Der Weg zur Kohlenstoffneutralität erfordert eine Kombination verschiedener Maßnahmen, darunter eine drastische Reduktion des CO2-Ausstoßes, etwa durch die Dekarbonisierung des Verkehrs, eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, die Umstellung industrieller Prozesse sowie eine Steigerung der Energieeffizienz. Darüber hinaus spielen Technologien zur Kohlenstoffspeicherung und -nutzung (CCS, CCU) eine entscheidende Rolle. Ferner ist eine Minimierung oder ein Verbot anderer Treibhausgase wie Aerosole, CFCs und HCFCs erforderlich. Ein weiterer wichtiger Schritt besteht in der Einschränkung der Nutzung fossilbasierter Produkte, insbesondere von Kunst- und Kraftstoffen. Vor diesem Hintergrund ist zu klären, welche Strategien und Technologien notwendig sind, um die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2050 erfolgreich umzusetzen.

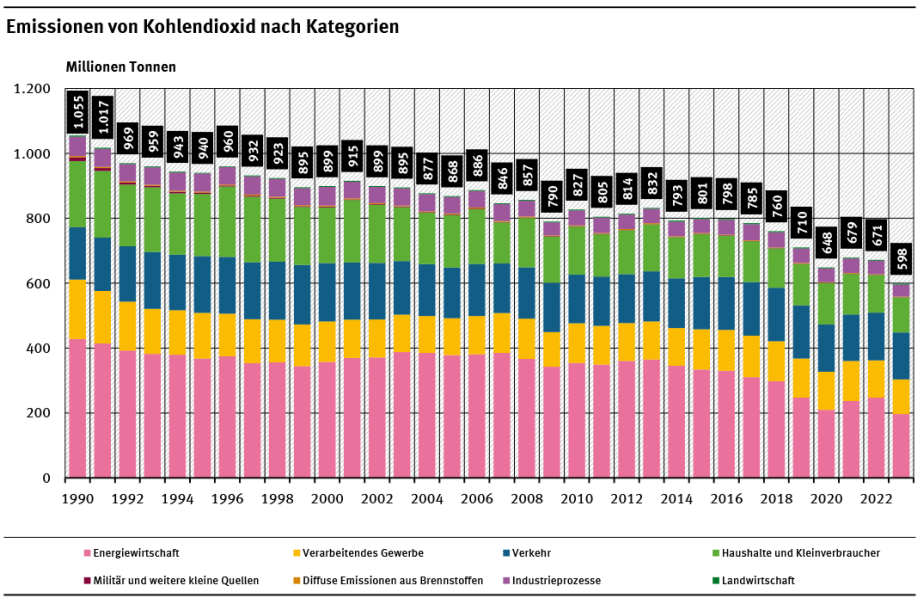


Abbildung 1: Emissionen von Kohlendioxid nach Kategorien in Deutschland [1]

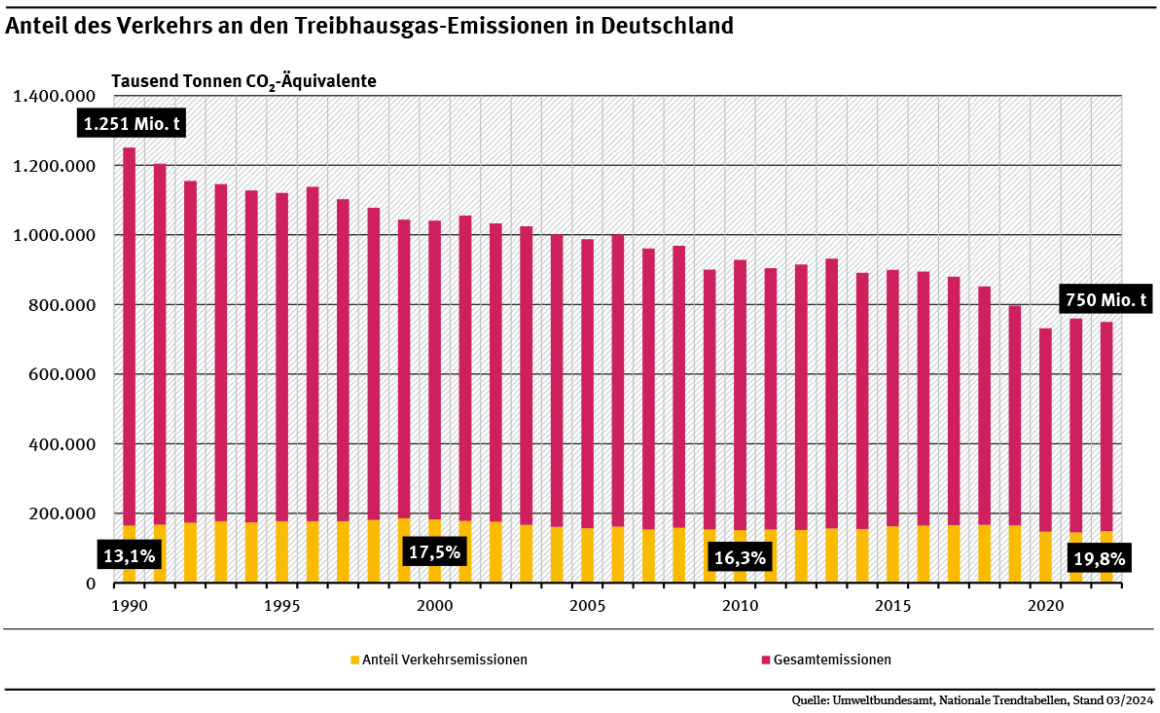


Abbildung 2: Anteil der deutschen Verkehrsemissionen[1]

In der vorliegenden Studie wird die Thematik der Reduktion von CO2-Emissionen behandelt. Der Fokus liegt auf der Verkehrsbranche, die im Jahr 2023 für 20 % der gesamten Emissionen Deutschlands verantwortlich ist. Im Vergleich zu 1990, als der Anteil bei 13 % lag, ist ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen. Dennoch zeigen die Emissionen des Verkehrs seit drei Jahrzehnten eine konstante Entwicklung, mit einem Wert zwischen 200 und 170 Millionen Tonnen CO2 p. a. Für den Verkehr gilt Elektrifizierung als die weitverbreitetste Lösung, und sie wird schon in manchen Sektoren eingesetzt. Aber das Thema „Mobilität“ ist sehr umfangreich und die Nutzungsanforderungen variieren erheblich, sodass eine einheitliche Lösung nicht realisierbar ist.

Im Bereich Verkehr konzentrieren sich die meisten Untersuchungen, Betrachtungen und Bemühungen auf Straßenfahrzeuge, Frachtschiffe und Flugzeuge, da diese mit Abstand die Hauptemittenten darstellen. Für andere Verkehrs- und Transportmittel z. B. im Bereich der Sportbootfahrt, die in geringerem Umfang zur Gesamtemission beitragen,

gibt es derzeit aber auch noch keine allgemein anerkannten Lösungen oder verbindliche Pläne zu einer nachhaltigen und zielführenden Emissionsminderung bis hin zur „Zero Emission“. Die Schiffsbranche stellt 3 % der weltweiten Emissionen dar, wobei Yacht und Sportbranche lediglich 0,4 % ausmachen.[2] Trotz dieser geringen Anteile empfiehlt es sich, insbesondere vor dem Hintergrund der o. g. Defizite bei den Hauptemittenten, frühzeitig und auf guter Datenbasis dazu mit Analysen und nachfolgend mit der Erarbeitung von Handlungsoptionen weiterentwickeln. Es ist aber nicht nur ein ökologisches Thema, sondern auch ein wirtschaftliches. Finanzmittel, Arbeitsplätze und Technologien sind mit dem Thema Yachten, Sportboote und Marinas verbunden. Es soll vermeiden werden, dass die Akteure dieser Branche von politischen Zwängen überrumpelt werden. Deshalb sollen in dieser Studie die zugehörigen Probleme angesprochen und Lösungsansätze diskutiert werden, um die positive und nachhaltige Weiterentwicklung dieser Branche zu unterstützen.

Zudem stellen Boote eine der komplexeren Kategorien innerhalb des Verkehrssektors dar, wenn es um Maßnahmen für Dekarbonisierung geht. Ein Motorboot braucht nämlich zehnmal mehr Energie als ein Auto derselben Größe.[3] Die International Maritime Organisation (IMO) hat sich für CO2-Reduktion engagiert und daraus eine eigene Zielsetzung für die internationale Seefahrt abgeleitet.[3] Die klimaschädlichen Emissionen sollen bis 2030 um 20 bis 30 % reduziert. Für die maritime Freizeitindustrie gibt es keine offizielle Zielsetzung, aber die Meinungen gehen auseinander. Auf der einen Seite fordern Wassersportler mehr Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit, auf der anderen Seite steht der Trend zu immer mehr leistungsstärker motorisierten Yachten, der keine Reduktion der Treibhausgasemissionen bewirkt. Es müssen also Maßnahmen ergriffen werden, damit die Bootsindustrie ihre Wende nicht verpasst.

Es wird zunächst eine Begriffsklärung vorgenommen, bevor die Thematik im Detail erörtert wird. Die Bezeichnung "Sportboot" umfasst eine Vielzahl von Wasserfahrzeugen, die zu sportlichen oder Freizeitzwecken genutzt werden. Dazu zählen Wassermotorräder, Motorboote, Segelboote und Yachten. Die Antriebe, die Verdrängung und die Länge können dabei variieren, da sie vom Verwendungszweck abhängig sind. In der vorliegenden Analyse werden daher nicht die Kategorien Arbeitsboot, Frachtschiff oder Kreuzfahrtschiff behandelt, sondern ausschließlich Sportboote. Die Mehrheit dieser Sportboote befindet sich im Besitz von Privatpersonen oder wird von Yacht-Bootcharterunternehmen betrieben. In Deutschland unterliegen Sportboote nicht der Registrierungspflicht, sodass genaue Angaben zur Größe der deutschen Sportbootsflotte nicht verfügbar sind.

Die vorliegende Studie fokussiert sich auf die Analyse der Perspektiven für Bootsbauer und Marinas im Hinblick auf eine potenzielle Wende in der Branche. Die Zusammenarbeit zwischen diesen beiden Hauptakteuren ist von entscheidender Bedeutung, um eine positive Entwicklung zu gewährleisten. Eine fragmentierte Herangehensweise, bei der jeder Akteur nur für sich arbeitet, wird voraussichtlich nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen. Sowohl die Marinas als auch die Hersteller warten auf Innovationen, wobei eine gegenseitige Abhängigkeit besteht. Das Ziel der vorliegenden Studie besteht folglich darin, eine Darstellung der heutigen Lage für Wassersportindustrie vorzustellen und Ideen für künftige Maßnahmen zu entwickeln.

Diese Studie ist in vier Hauptteile gegliedert, um die genannten Probleme zu lösen. Zunächst werden die ***technischen*** Aspekte erörtert, wobei innovative Antriebe für Sportboote und neue Infrastrukturanforderungen für Marinas thematisiert werden. Im weiteren Verlauf werden die ***regulatorischen*** Aspekte entwickelt, in deren Zertifizierung, Sicherheit und Versicherung diskutiert werden. Dies ist von besonderer Relevanz, da es in dieser Branche kaum Standardlösungen gibt. Abschließend werden die ***politischen und wirtschaftlichen*** Aspekte analysiert. Aufgrund der Aktualität des Themas ist es essenziell, die Marktfähigkeit der Lösungen zu gewährleisten, sowohl in der Gegenwart als auch in der Zukunft. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da sowohl die Beteiligten als auch die Arbeitsplätze in hohem Maße von der Marktgängigkeit abhängig sind. Danach wird ein Vergleich zwischen den verschiedenen Arten von Booten und den unterschiedlichen Bedürfnissen von Marinas und Yachtcharter gemacht, um zukünftige ***Visionen*** von Marinas in bestimmten Fällen zu überlegen. Aufgrund der signifikanten Diversität der Marinas wurde die Entscheidung getroffen, die Analyse auf drei ausgewählte Wasserbereiche zu konzentrieren. Diese Auswahl ermöglicht eine umfassende Untersuchung des Spektrums an Möglichkeiten, um eine klare und repräsentative Vorstellung von den Potenzialen in den verschiedenen Bereichen zu erlangen. Infolgedessen werden der Binnenbereich, der Seebereich - insbesondere der Bodensee und die Küstengebiete - speziell der Nord/Ostsee, in die Analyse miteinbezogen.

2. Technische Aspekte der Thematik

2.1. Antriebe

2.1.1. Elektroantriebe

Die Elektrifizierung der Antriebe steht im Zentrum der Betrachtung der nachhaltige Verkehr. BEVs (Battery Electric Vehicles) werden die Batterie über eine Ladesäule aufgeladen. Dann steuert das „Battery Management System“ (BMS) die Energie zwischen Batteriepack und Motor. Abhängig vom Motortyp kann ein AC/DC-Wandler zwischen dem BMS und dem Motor vorhanden sein. Normalerweise ist das System, welches das Zubehör im Inneren des Bootes versorgt (Kühlschrank, Klimaanlage, Herd, Licht, Wasser, Navigation, usw.) in einem zweiten Stromkreis mit einer Blei-Säure-Batterie untergebracht; wie bei einem Boot mit konventionellem Antrieb. Die Batterien können entweder Lithium-Ionen-Batterie, und zwar LiFePO4-Batterie, weil die Leistung im Ausgang stärker ist, oder auch einer Blei-Säure-Batterie sein.[4]

Li-Ion-Batterie haben eine größere Energiedichte und eine bessere Entladetiefe. Dies ist der Prozentsatz einer Batterie, der entladen werden kann, ohne Schäden zu verursachen. Lithium-Ionen-Batterien können in der Regel um etwa 86-98 % entladen werden, während Blei-Säure-Batterien eine Entladung bewältigen können, die näher bei 30-50 % liegt. Das bedeutet, dass ein Lithium-Ionen-Akku zu jedem Zeitpunkt einen um 30 % größeren Betriebsbereich hat. Es bedeutet auch, dass Lithium-Ionen-Batterien weniger anfällig für Schäden sind, die aus der Überschreitung der Entladetiefe resultieren. Blei-Säure-Batterien sind jedoch sehr gut für den Einsatz auf See geeignet und können hohe Stromdichten in einem kurzen Zeitraum liefern, was bei Manövern oder beim Starten des Boots nützlich sein kann.[5]

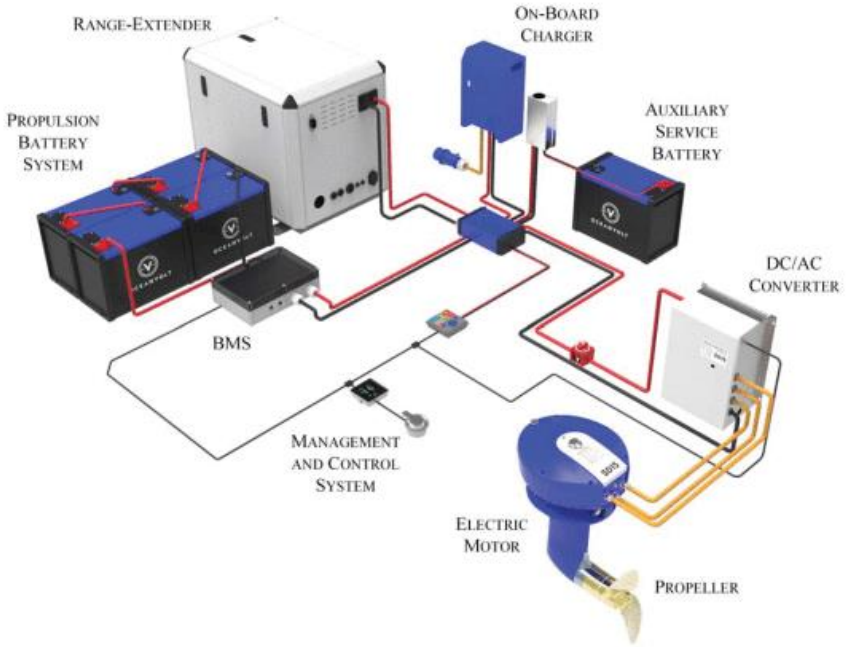


Abbildung 3: gesamter Elektroantrieb[6]

Elektroantriebe ermöglichen eine emissionsfreie Fortbewegung, wenn erneuerbare Strom zur Verfügung steht. Sie haben noch viele weitere Vorteile für den Wassersportler. Elektrische Antriebe sind geräusch- und geruchlos. So ist das Fahren mit Elektroantrieben für den Wassersportler angenehmer. Außerdem vibriert der Elektromotor weniger als der Verbrennungsmotor. Boote mit Elektroantrieben bieten also auf den ersten Blick ein besseres Fahrgefühl als Boote mit herkömmlichen Antrieben. [7]

Elektromotoren brauchen auch weniger Wartung und sind langlebiger als klassische Verbrenner.

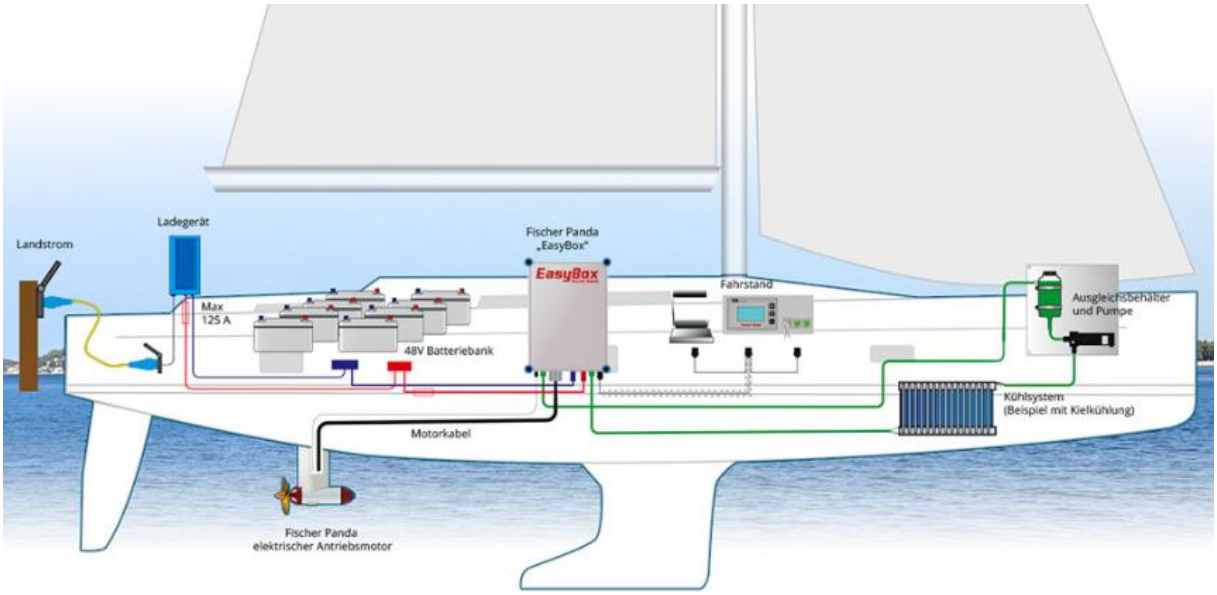


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines E-Boots mit POD-Antrieben[8]

Außerdem wird das Motordrehmoment dank der Elektromotortechnologie direkt auf den Abtrieb übertragen. Die Motoren können in unterschiedlich technischen Ausführungen konzipiert sein. Elektromotoren verfügen über einen sehr hohen Wirkungsgrad bis zu 96 %. Auf dem Markt sind bürstenlose Motoren heute Stand der Technik. Diese Motoren können - wie bei Dieselmotoren - Innenbord eingesetzt werden, aber auch direkt neben dem Propeller unten dem Rumpf. Einige Bootsbauer verwenden synchrone Maschinen mit Permanentmagneten. Das Prinzip ist das gleiche: Statische Magnete oder Spulen mit variablen Polen treiben magnetisch einen Rotor an, der seine Bewegung auf den Schlepper überträgt. Der Unterschied liegt in der Messung der Lage des magnetischen Pols. Der bürstenlose Motor verwendet einen Hall-Effekt-Sensor, während der anderen Bürsten verwenden. Bürstenlose Motoren sind zwar präziser, aber auch teurer. Andere Motorenhersteller bevorzugen Asynchronmotoren, die auf die gleiche Weise funktionieren, jedoch mit einem Winkelversatz zwischen dem rotierenden Magnetfeld und dem Rotor. Sie sind einfacher zu installieren, da sie keine Synchronisationszeit beim Anlaufen benötigen, und sie sind zuverlässig und einfach zu warten.[9]

Marke	Modelle	Motor	Antriebsort	Leistung	Drehzahl	Akkuskapazität	Gewicht max. der Boot	größe max. der Boot	Geschwindigkeit max.	Bootsart	Sondern
Oceanvolt	SD	Synchronous with permanent magnet	Outboard	6 kW	1140 rpm	48V	12t	15m		Sailsboat	30 % regenerativ bis 11km/h
Oceanvolt	Servoprop	Synchronous with permanent magnet	Outboard	15kW	1140 rpm	48V	12t	15m		Sailsboat	30% regenerativ bis 11km/h
Oceanvolt	AX	Synchronous with permanent magnet	Onboard	3,7-8,3kW	2400 rpm	48V	25t	20m		Welleantrieb	
Oceanvolt	AXC	Synchronous with permanent magnet	Onboard	10-20-30-40kW	2400rpm	48V	25t	20m		Welleantrieb	
Torqeedo	Travel	Brushless motor	Outboard	0,4-1kW		0,915kWh	bis 1,5t			Outboarder	
Torqeedo	Ultralight	Brushless motor	Outboard	0,4-1kW		0,915kWh	bis 1,5t			Outboarder	
Torqeedo	Cruise	Brushless motor	Outboard	2,4-10 kW		24V/3,5kWh 48V/5kWh		120 feets	20-25km/h	Outboarder sailboat	
Torqeedo	Deep Blue	Brushless motor	Onboard	25-50kW	900-2500 rpm	345V/12,8kWh 345V/30,5kWh			55km/h	Sailsboat or displacement boat	Batteriepack aus BMW entwiclung
Aquawatt	Green Power	AC Induction Machine	Outboard	15kW		50V/8-30kWh	bis 3t		18-31km/h		
Aquawatt	Green Racing	AC Induction Machine	Outboard	26kW		80V/12,8-165kWh			41-48km/h	lightweight planning hulls	
Aquawatt	Green Thruster	AC Induction Machine	Outboard	26kW		80V/12,8-165kWh	10t		41-48km/h	displacements hulls and planning boats	
Aquawatt	Green Flash	AC Induction Machine	Outboard	50kW		144V/23-29kWh			56km/h		
Aquawatt	Direct drive	AC Induction Machine	Onboard	4,6-6-10-20 kW	1500-2000 rpm	48V 96V					
Aquawatt	Geared motor	AC Induction Machine	Onboard	20-30-50 kW		80V 144V				•	angepasst zu Bootseigenschaften
Aquamot	Trend-Line	AC Induction Machine	Outboard	1,1-1,3-1,6-1,8 kW		24V/0,64kWh 24V/1,28kWh	4t			Sailsboat	
Aquamot	Professionnal-Line	AC Induction Machine	Outboard	1-30kW		24-96V					
Epropulsion	E-Lite		Outboard	0,1-0,5kW	1500-1700rpm	25,2V /0,378kWh				sehr kleine Boot	Alle Motoren sind kompatibel mit extern Batterien
Epropulsion	Spirit 1,0		Outboard	1kW		48V/1,276kWh					
Epropulsion	Navy		Outboard	3-6kW		48V/3,0kWh					
Epropulsion	Pod drive		Outboard	1-3kW						Sailboats	
Epropulsion	Vaquita		Outboard							Stand up Padel	
Epropulsion	X Series		Outboard	12-20-40kW	1100-2100rpm	96V			35km/h	Outoarder	
Epropulsion	I-Series		Onboard	10-20-40kW	1500rpm	86-115V				Cruiser, Kanalboote,Wasserbusse,Arbeitsboot und onboard sailboats	

Abbildung 5: Beispiele von Elektromotoren für Boote[6]

Diese Lösungen können direkt in dieselbetriebene Boote eingebaut werden, indem der Verbrennungsantrieb durch eine der elektrischen Lösungen ersetzt wird. Dies kann zu Problemen führen, da die Antriebs- und Steuerungssysteme anders ausgelegt werden müssen. Die Leistungselektronik muss sorgfältig ausgeführt werden, damit es an Bord nicht zu Bränden kommt, die durch eine zu schwache Verkleidung oder einen Runaway-Effekt der Batterien verursacht werden können. Wenn die Batterien Feuer fangen, ist es sehr schwierig sie zu löschen, weshalb einige Hersteller den Batteriepack gekapselt haben.

Elektroantriebe haben auch Nachteile. Wie bei Autos, verursachen Batterien Probleme. Aufgrund der dominierenden Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien und des damit verbundenen Bedarfs an zahlreichen seltenen Erden, zeichnen sie sich durch eine hohe Materialintensität aus.

Vor allem ist der Reichweite von Batterie-Boote ein Thema: Die meisten Boote auf dem Markt bieten eine maximale Reichweite von 100-200 km, und diese Reichweite ist nur bei einer niedrigen Geschwindigkeit von ca. 10km/h möglich. Will der Wassersportler schneller fahren, sinkt die Reichweite. Für Küstenfahrten sollten die Boote in der Lage sein, lange Strecken ohne Ladung zurückzulegen. Das ist aber derzeit nicht der Fall. Eine weitere Gefahr ist das Wetter: Wind, Wellen, Stürme und Meeresströmungen. All diese Störungen können die Batterien schneller entladen und das Risiko erhöhen, mitten auf einer Fahrt ohne Energie zu sein.

Am Bodensee ist das etwas anders. Für Gebiete wie ein See braucht man keine so große Reichweite. 90 km sind ausreichend. Mit den Einschränkungen am Bodensee haben E-Boote eine Chance, aufgenommen zu werden, da ab 2035 Verbrennungsmotoren am Bodensee verboten sind und die Geschwindigkeit auf 15km/h begrenzt wird. Auf den Binnengewässern können sie auch ihren Platz finden, da die Geschwindigkeiten auf die Kanäle auf 12 km/h beschränkt sind. Mit diesen Beschränkungen können Boote in Innenwasser 4 bis 8 Stunden fahren und dann brauchen sie 10 bis 12 Stunde Ladung. Diese Auslegung ist zu kleinere Boote angepasst. Das heißt, die Boote fahren am Tag und sollen über Nacht für die morgige Fahrt geladen werden. [10]

Um dieses Reichweitenproblem zu lösen, bieten einige Bootshersteller Hybridboote an. Sie funktionieren wie die hier vorgestellten Elektroboote, jedoch ohne Ladevorgang. Sie arbeiten mit einem Strom erzeugenden Dieselgenerator, wenn die Batterien fast leer sind. Da Diesel leichter an Bord zu transportieren ist, haben Hybridboote eine größere

Reichweite. Außerdem gibt es keine Gerüche, Geräusche oder Vibration, außer wenn der Generator läuft. [6]

Diese neuen innovativen Lösungen zwingen die Bootsbauer dazu, Ideen zur Energieeinsparung zu entwickeln. Beim Segeln kann der Propeller in die entgegengesetzte Richtung gedreht werden und so als Antrieb dienen, so dass der Motor wie ein Stromgenerator funktioniert. Bootsrümpfe werden immer weiter optimiert, um den Wasserwiderstand zu verringern und Treibstoff zu sparen. Auch das Konzept der Hydrofoil, verbreitet sich in der Elektrosportbootindustrie, da es eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bis zu 80 % ermöglicht. Allerdings sind Elektroantriebe derzeit noch sehr kostenintensiv. Im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren sind Elektroantriebe 4- bis 5-mal so teuer. Auch die Foil-Technologie ist sehr hochpreisig und beschränkt den Markt für neue innovative Sportboote. [11]

2.1.2. Biokraftstoffe

Es wird 30 bis 40 Jahre dauern, bevor alle Verbrennungsmotoren ausgetauscht werden. Daher statt alle Verbrennungsmotoren in Elektromotoren umzurüsten, betrachtet man Alternativen wie Biokraftstoff oder synthetische Kraftstoffe aus erneuerbare Energie (E-Fuels).[10] Diese wurden entwickelt, um direkt in den aktuellen Verbrennungsmotoren genutzt zu werden. Sie sind die so genannten „Drop In Fuels“. Biokraftstoffe stammen aus der Zersetzung von organischem Material und können verschiedene Arten annehmen. Es gibt u. a. Biodiesel (FAME, Fatty Acid Methyl Esters) und das HVO (Hydrotreated Vegetable Oils). Um FAME in einem Verbrennungsmotor zu verwenden, sind vorab Kompatibilitätsprüfungen und Anpassungen erforderlich. Insbesondere muss geprüft werden, ob die Einspritzkomponenten für FAME geeignet sind, da dieser Kraftstoff viskoser und korrosiver ist als herkömmlicher Diesel. Der Vorteil von HVO besteht darin, dass solche Anpassungen vor dem Einsatz nicht notwendig sind. Dieser Kraftstoff kann entweder rein oder gemischt mit Diesel oder LPG verwendet werden. Man unterscheidet B20, B50 und B100 oder HVO20, HVO50 und HVO100 jeweils nach ihrem Anteil an Biokraftstoff im letzteren. HVO-Kraftstoff muss gemäß der Norm 15940 hergestellt werden. Er kann bei einigen Motoren zu einem Effizienzverlust und damit zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs um 6 % führen. Andererseits kann er bei reiner Verwendung die CO2-Emissionen um bis zu 90 % und die Feinstaubemissionen bis zu 33 % senken. Es ist wichtig vor dem Gebrauch zu prüfen, ob der Motor mit dieser Art von Treibstoff kompatibel ist.[12] Während ihrer Lagerung müssen Biokraftstoffe regelmäßiger getestet und ausgetauscht werden als konventionelle Kraftstoffe.

Es gibt auch das Ammoniak, LNG und Methanol, die ihre eigenen Eigenschaften haben und eine technische Anpassung des Motors erfordern, um einen sachgerechten Betrieb sicherzustellen. Diese Kraftstoffe benötigen nämlich aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften, die sich von denen konventioneller Kraftstoffe unterscheiden, Arbeiten an der internen Verbrennung des Motors. [13]

Diese Kraftstoffe zählen zu den erneuerbaren synthetischen Energiequellen und leisten einen Beitrag zu einem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf, indem während ihrer Herstellung Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entzogen und in die erzeugten Kraftstoffe integriert wird.

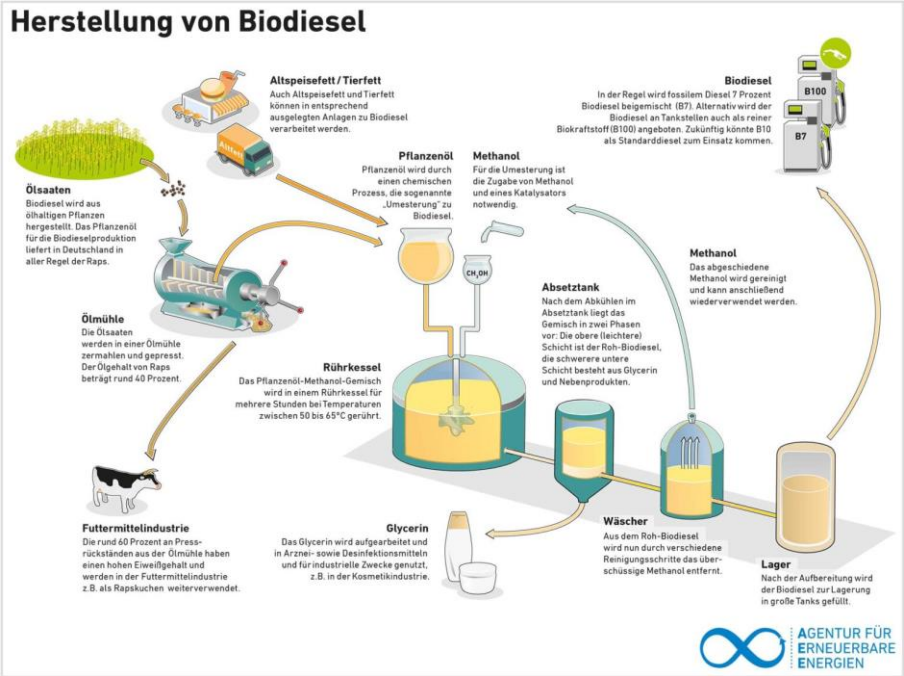


Abbildung 6: Herstellung von Biodiesel[14]

HVO ist speicherbar unter normalen Bedingungen und direkt einsetzbar in heutige Verbrennungsmotoren - ohne zusätzlichen Materialaufwand. So können sie schon an Tanksäulen angeboten werden. Dies ist der Fall in manchen Marinas, z. B. am Bodensee, wo einige Marinas keinen konventionellen Diesel mehr anbieten, sondern nur Biodiesel HVO. Für das Benzin ist es komplizierter, denn das Benzin ist noch nicht verfügbar als Biokraftstoff.

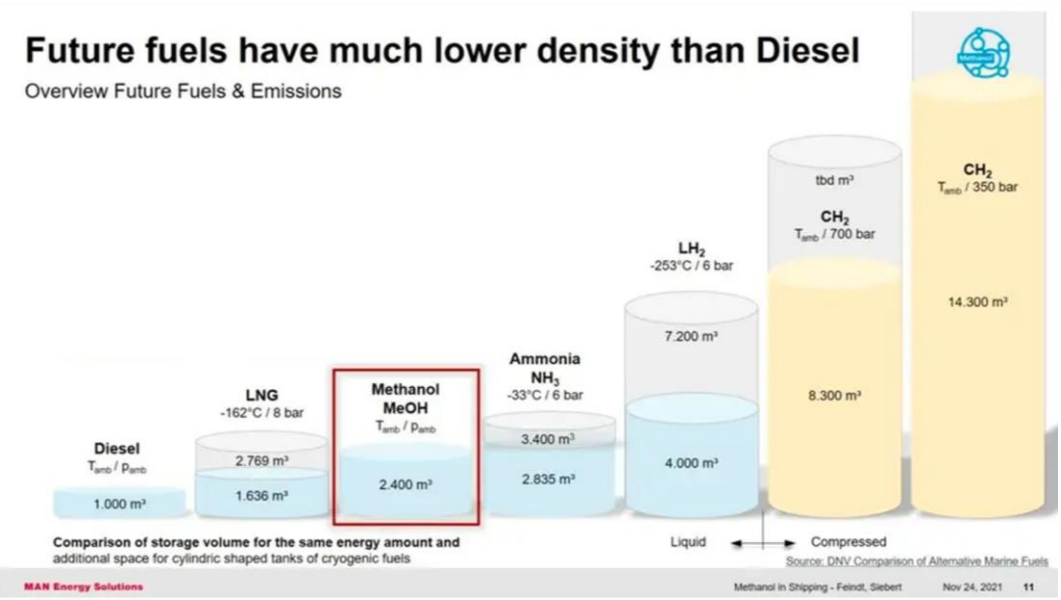


Abbildung 7: volumetrische Energiedichte von alternativen Kraftstoffen[2]

Außerdem können Elektroantriebe mit Biokraftstoff, insbesondere Methanol, gemischt werden. DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) Brennstoffzellen können Strom erzeugen, um die Batterie zu laden. Das funktioniert eigentlich wie die vorliegenden Hybridantriebe, aber in diesem Fall übernimmt eine Brennstoffzelle die Funktion, die sonst von einem Generator erfüllt wird. Methanol ist eigentlich einfach zu speichern - bei atmosphärisch Druck und Außen Temperatur. Es braucht 2,4-mal mehr Volumen als Diesel und verfügt bei gleichem Volumen über nahezu identische Masseeigenschaften (0,79 kg/l für Methanol und 0,84 kg/l für Diesel). [2]

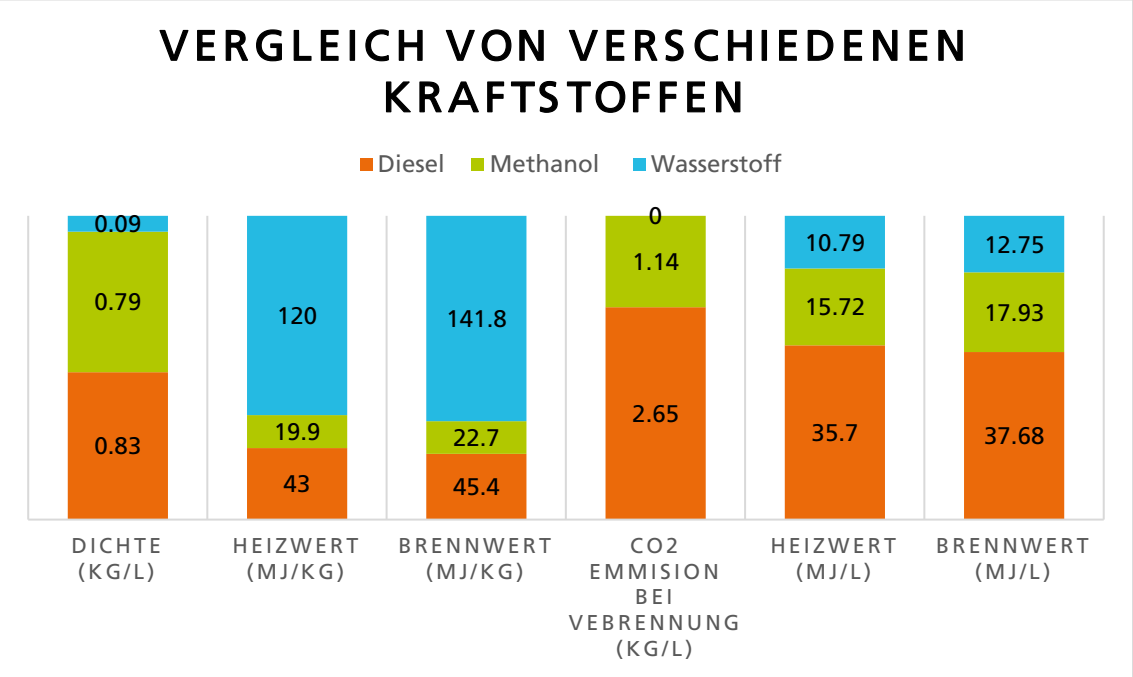


Abbildung 8: Vergleich von verschiedenen Kraftstoffeigenschaften[15]

2.1.3. Wasserstoffbasierte Kraftstoffe

Der Wasserstoff wird im Kontext der Energiewende als ein vielversprechender Lösungsansatz betrachtet. Er kann nicht nur als Energieträger, sondern auch in vielen Industriezweigen eingesetzt werden, zum Beispiel in der Stahlindustrie für Eisenschwamm oder in der Düngemittelindustrie, sowie in der Schifffahrt. Der Wasserstoff kann unterschiedlichen Ursprungs sein. Er kann aus Kohlevergasung (schwarz und braun), Dampfreformierung (grau und blau), thermischer Methanspaltung (türkis) und Elektrolyse (gelb, grün, rosa) stammen. Um eine Nachhaltige Sportbootfahrt zu ermöglichen, würde man grünen Wasserstoff einsetzen, denn er ist erneuerbar, da er durch ein Elektrolyseverfahren mit erneuerbarem Strom hergestellt wird. Der CO2-Fußabdruck ist damit bei der Wasserstoffproduktion am geringsten.

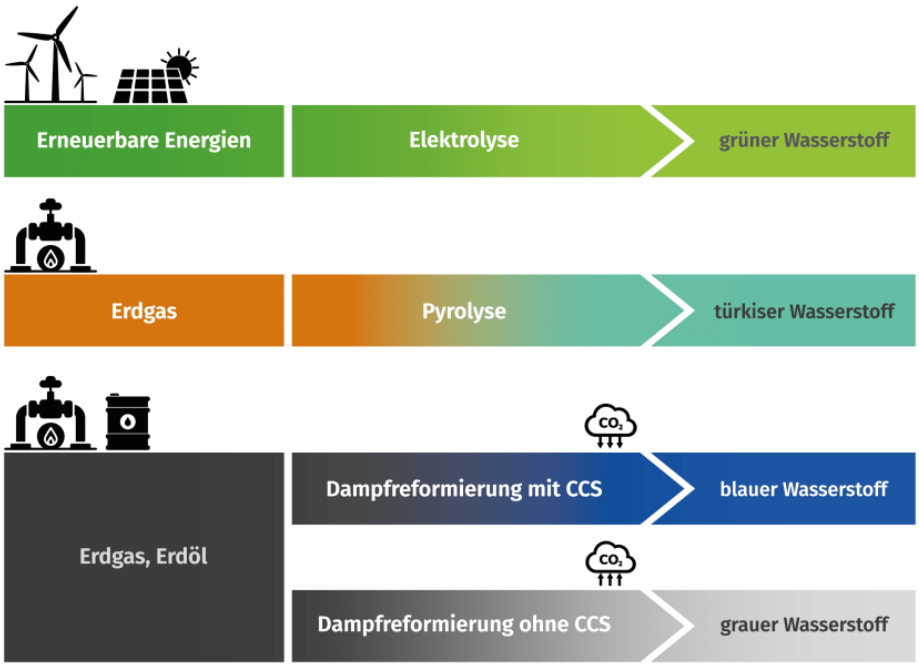
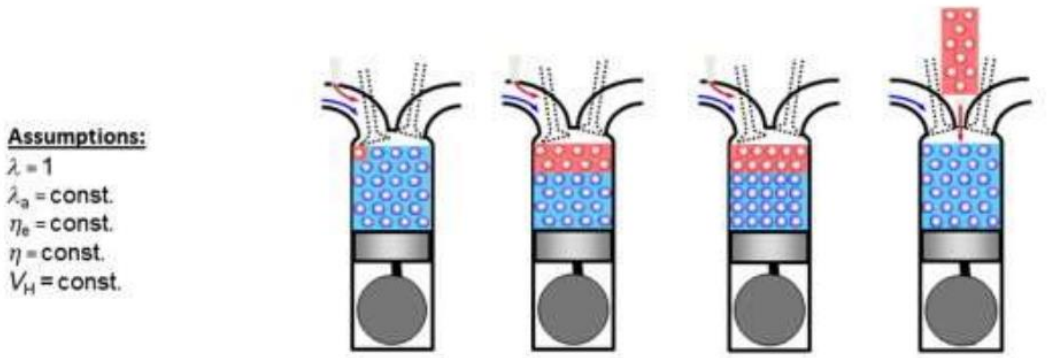


Abbildung 9: Wasserstoffproduktionsverfahren[16]

Wasserstoff kann direkt in Verbrennungsmotoren eingespritzt werden. Diese Lösung ist noch nicht sehr verbreitet. Es gibt bereits einige Schiffe, die mit Wasserstoff fahren, aber Wasserstoff ist bei Kontakt mit Sauerstoff leicht entflammbar. Wasserstoff kann zu einer höheren Leistungsfähigkeit beitragen. In einem Verbrennungsmotor wird mehr Energie pro Kubikmeter Brennraum eingespritzt, wodurch die Motorleistung um bis zu 17 % gesteigert werden kann.

Außerdem verringert seine geringe Dichte bei Raumtemperatur seine volumetrische Energiedichte um ein Vielfaches. Um als Treibstoff verwendet zu werden, müssen entweder die Tanks riesig sein oder das Wasserstoffgas muss stark komprimiert und/oder kryogenisiert werden. Diese Tanks sind sehr teuer und bieten auch eine geringere Reichweite als Diesel.



Assumptions:
$\lambda = 1$
λ_a = const.
η_e = const.
η = const.
V_H = const.

Fuel	**Gasoline**	**Hydrogen**	**Hydrogen**	**Hydrogen**
Mixture formation	Port injection	Port injection	Cryogenic port injection	Direct injection
Mixture temperature (K)	293	293	210	293
Mixture cal. value (MJ/m³)	3.59	2.97	4.14	4.21
Specific power (%)	**100**	**83**	**115**	**117**
	State of the art		*Advanced technology*	

Abbildung 10: Kraftstoffverbrennungskennwerte[17]

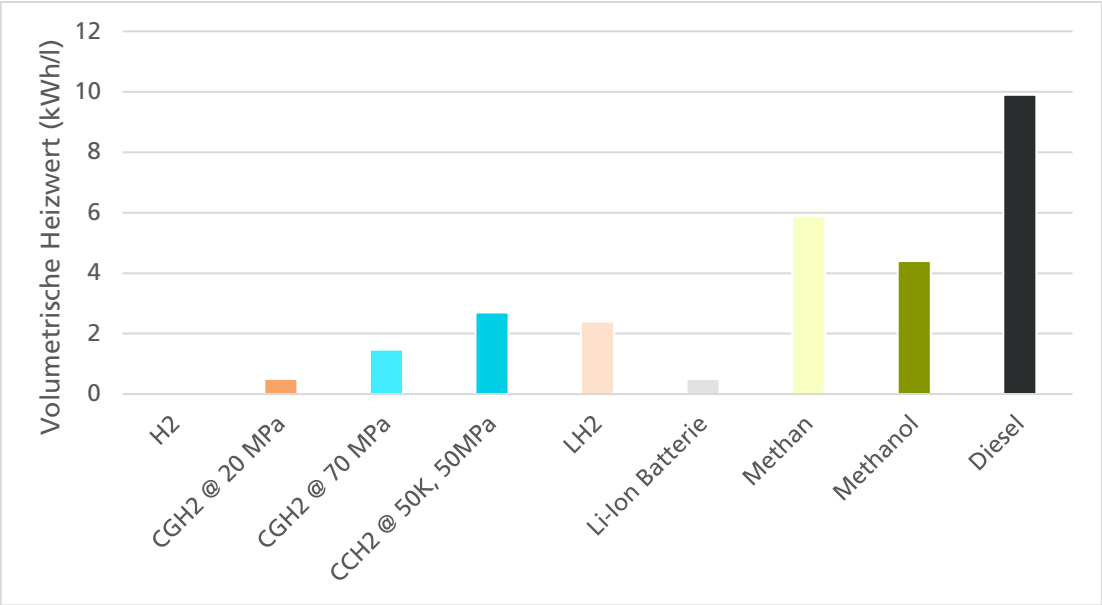


Abbildung 11: Volumetrischer Heizwert von Kraftstoffen [15,17]

Wasserstoff kann auch rein in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung verwendet werden. Der Prozess ist der gleiche wie bei der DMFC, aber Wasserstoff-Brennstoffzellen

verwenden Wasserstoff, um Strom zu erzeugen. Es ist theoretisch ein Elektrolyseprozess, nur umgekehrt.

E-Fuel ist eine weitere Lösung. Das sind synthetische Kraftstoffe, die aus Wasserstoff und Kohlendioxid hergestellt werden. Sie haben die gleichen physikalischen Eigenschaften wie herkömmliche Kraftstoffe (Benzin/Diesel). Sie können daher direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Diese Lösung würde auch den Materialaufwand für die Umrüstung der gesamten deutschen Flotte reduzieren. Tests mit E-Fuel zeigen, dass sie funktionieren wie herkömmliche Motoren, verbrauchen aber 15-20 % mehr Kraftstoff[1].

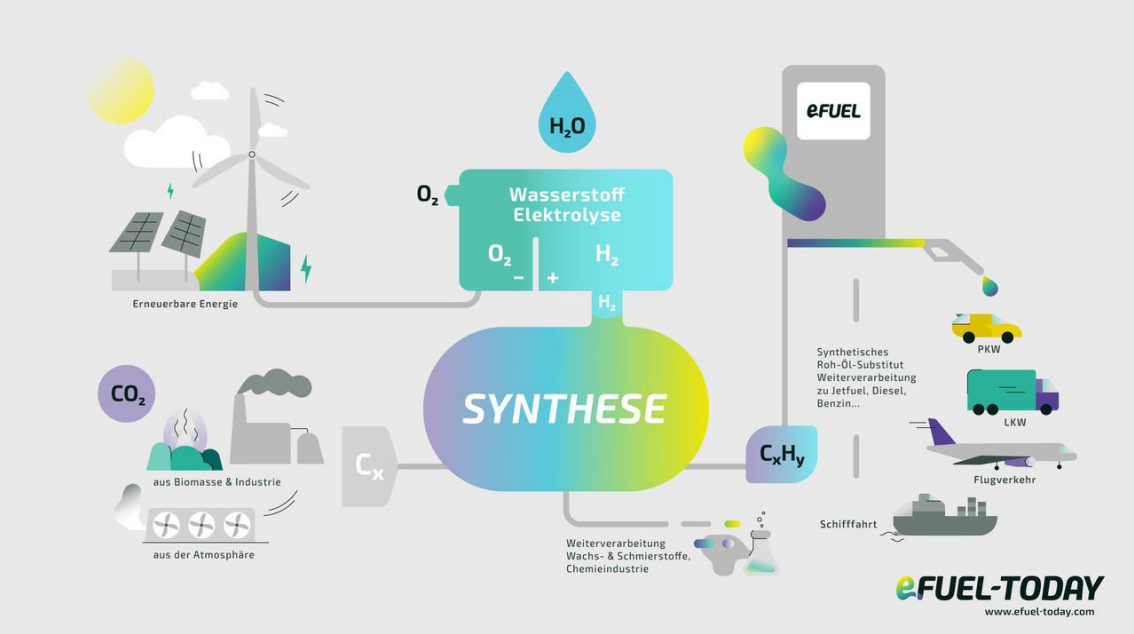


Abbildung 12: E-Fuel Herstellung [18]

Wasserstoffbasierte Lösungen (E-Fuels) befinden sich derzeit noch in der Entwicklungsphase, können aber sehr interessant sein. Sie werden von Wassersportlern erwartet insbesondere in Marinas aufgrund der Einfachheit der Lagerung von E-Fuel, die wenig Investitionen erfordert. Diese synthetischen Kraftstoffe werden jedoch je nach Szenario erst in 10-20 Jahren weltweit verfügbar sein. Es stellt sich auch die Frage der Versorgungskette, denn Wasserstoff ist eine Lösung, die von allen Akteuren in verschiedenen Sektoren erwartet wird. In der Tat werden bestimmte Industrien aufgrund ihres Energiebedarfs und ihrer Umweltauswirkungen beim Zugang zu Wasserstoff bevorzugt, sodass Wasserstoff als Energieträger wird, der die Unstetigkeit der

[1] Interview mit Herr Marx (DBSV)

erneuerbaren Energien ausgleicht, auch von der Luftfahrtindustrie, der Stahlindustrie und der Düngemittelindustrie erwartet, und die Wasserstoffproduktion wird sehr schnell eine große Nachfrage befriedigen müssen.

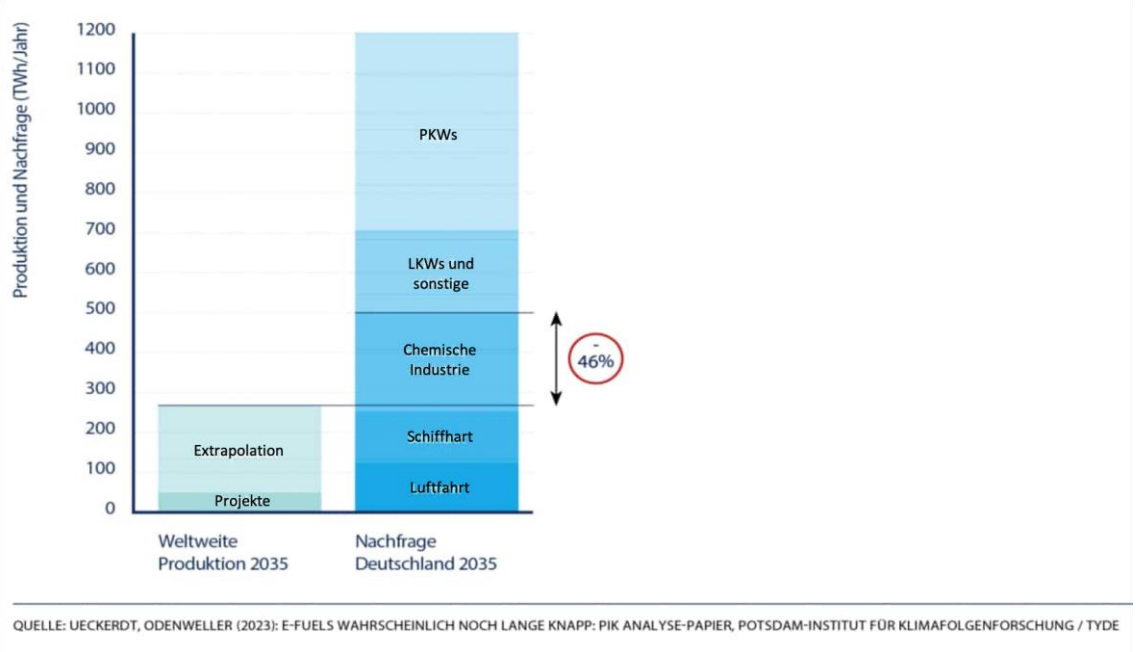


Abbildung 13: Szenarien über E-Fuels Produktion[3]

2.1.4. Vergleich der Technologien in Bezug auf die Reichweite

Marke	Model	Größe (im m)	Art von Boote	Leistung (in kW)	Kapazität (kWh)	Kreuzfahrt (max.) Geschwindigkeit (km/h)	Autonomie (km @ km/h)	Preise (ab... €)
X Shore	X Shore 1	6,5	Motorboot	120	65	37 (55)	50 @ 20	150k
X shore	Eelex 8000	8	Motorboot	220	90/120	33 (75)	140 @ 20	250k
Frauscher	610 San Remo	6,1	Motorboot	4,3/15	9,1/18,2	10 (19)	100 @ 10	44k
Frauscher	650 Alassio	6,5	Motorboot	50	40	10 (30)	83 @ 10	53k
Frauscher	740 Mirage	7,5	Motorboot	60/110	80	10 (43)	60 @ 10	220k
Ruban Bleu	Ace	3,9	Kleinboot	0,65	-	- (7)	49 @ 7	-
Ruban Bleu	Sensas	4,5	Kleinboot	1,8	-	- (8)	56 @ 8	-
Ruban Bleu	Scoop	4,8	Kleinboot	1,6	-	- (8)	56 @ 8	-
Ruban Bleu	Legend	5,6	Kleinboot	1,6/2,2	-	- (10)	80 @ 10	-
Ruban Bleu	Most	5,9	Kleinboot	2,2	-	- (10)	80 @ 10	-
Ruban Bleu	Navette	8,5	Kleinboot	2*5	64,4	10 (-)	100 @ 10	-
Rand	Picnic 18	5,9	Kleinboot	4-50	20	9 (20)	58 @ 79	25k
Rand	Play 24	7,4	Motorboot	130	26,5	13 (74)	65 @ 19	75k
Rand	Supreme 27	8,4	Motorboot	240	120	13 (74)	97 @ 13	170k
Rand	Leisure 28	8,4	Motorboot	240	120	13 (74)	97 @ 13	178k
Naviwatt	Cata 6	5	Kleinboot	12	10	5,5 (24)	72 @ 5,5	45k
Naviwatt	Zenpro	3,3-6,9	Kleinboot	12-120	-	-	-	-
Naviwatt	Cata 900	7,4	Kleinboot	2*5	20	10 (17)	120 @ 10	-
Natural Yacht	Northman Nexus Revo 870	8,7	Motorboot	10	custom mit BSZ range extender möglich	-	-	-
Natural Yacht	Northman 1200	12,7	Motorboot	20	custom mit BSZ range extender möglich	-	-	-
Natural Yacht	Maxus	7,2-10,5	Segelboot	18	33	-	-	-
Lex Handelks KG	Lex 610	6,1	Motorboot	60	-	- (41)	-	-
Lex Handelks KG	Lex 790	7,9	Motorboot	150	-	- (65)	-	-
Boesch	620 Acapulco De Luxe	6,2	Motorboot	50/80/100	37,5/62,5/75,2	- (42/50/55)	60 @ 40	-
Boesch	710 Costa Brava De Luxe	7,5	Motorboot	2*50	2*35,6	- (48/53)	53 @ 40	-
Domani Yachts	E32	9,5	Motorboot	50	38/56/75	15 (28)	74/120/180 @ 15	-
Domani Yachts	S30	9	Segelboot	2/4/10	3,5/5	-	-	-
Candela	Candela Seven	7,7	Motorboot	55	45	40 (56)	90 @ 40	-
Hovercraft	Electricat	4,5	Kleinboot	3,7/11,2	-	14/25 (-)	100 @ 14/25	-
Q Yacht	Q30	9,3	Motorboot	20	39	17 (28)	78 @ 17	-
Hellwig	Poros	3,9	Kleinboot	2	2,8	11 (-)	9,7 @ 11	-
Neocean	Overboat	3,1	Kleinboot	3	3,4	14 (20)	40 @ 20	-

Abbildung 14: Eigenschaften von verschiedene Elektroboote[6]

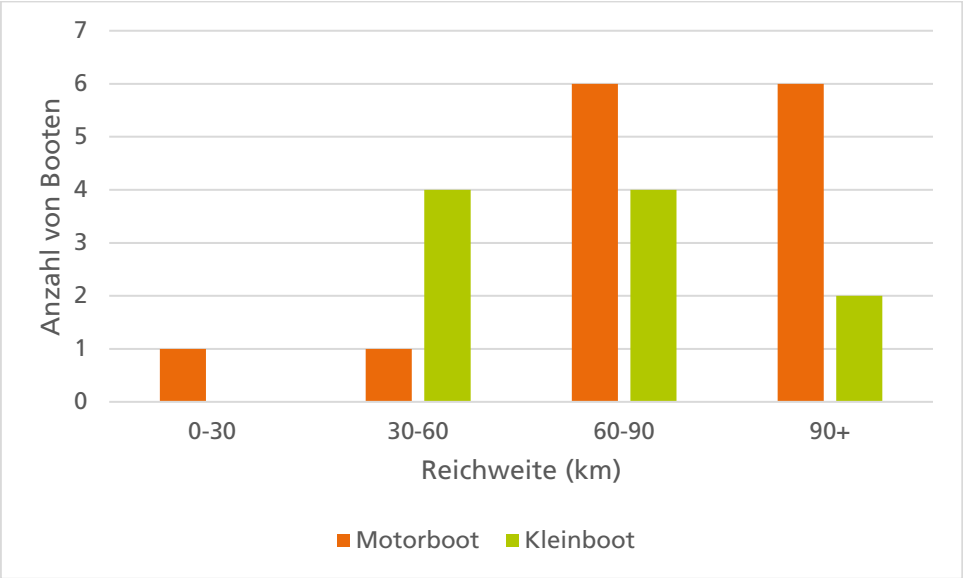


Abbildung 15: Reichweiten für verschiedene Boote (im km)

In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die verschiedenen Reichweiten an den Verwendungszweck der Boote angepasst sind. Die meisten Motorboote, die in diese Studie einbezogen werden, haben eine Reichweite von mehr als 60 km. Das ist für den Tagesgebrauch ausreichend, aber für einen mehrtägigen Aufenthalt auf See fernab von jeglicher Infrastruktur scheint es zu wenig zu sein.

Für Segelboote ist es anders. Da Segelboote nicht die ganze Zeit mit ihrem Motor, sondern mit ihren Segeln fahren können/wollen, müssen die Motorleistung und die Kapazität des Akkupacks auf die speziellen Bedürfnisse von Segelbooten abgestimmt werden. Für Segelboote empfiehlt sich in der Regel eine Motorleistung von 1 kW pro Tonne Verdrängung in ruhigen Gewässern und 2,5 kW pro Tonne Verdrängung auf Strömungsgewässern. Die Batteriekapazität kann dann entsprechend der Motorleistung angepasst werden. Wenn der Besitzer z. B. eine Reichweite von 6 Stunden hat und ein Boot mit einem 10 kW Motor besitzt, dann benötigt er 60 kWh an Speicherkapazität. Es ist wichtig zu wissen, dass diese Berechnung nur unter perfekten Bedingungen zutrifft, also ohne Strömungen und Wind, die den Weg des Boots beeinträchtigen.

	Modelle	Länge	Energieträger	Leistung	Energiekapazität	Geschwindigkeit (km/h)	Reichweite (km)
Motorboote	X Shore Eelex 8000	8m	Elektro	170 kW	90-120 kWh	37	60
	Motor Volvo Penta D4	10m	Diesel	191 kW	600 l	50	700
	Yanmar EX38A FC	12,4m	Brenstoffzelle	250 kW	8 x 70 Mpa tanks	/	100- 200
Segelboote	OceanVolt Servoprop	10m	Elektro	15-20 kW	20 kWh	10 km/h	70
	Yanmar 3YM20/30	10m	Diesel	22 kw	150l	10 km/h	600
	Hypothese	10m	Brenstoffzelle	/	8kg 35 Mpa	10 km/h	150
Kleine Boote	Torqeedo Travel 603	3,5 m	Elektro	1 kW	5 kWh	10 km/h	30
	Mercury 25	5m	Diesel	10 kW	50l	10 km/h	130
	Prototype H2 Marine eD Tech	5m	Brenstoffzelle	10 kW	2 kg H2	10 km/h	50

Abbildung 16: verschiedene Antriebsmöglichkeiten

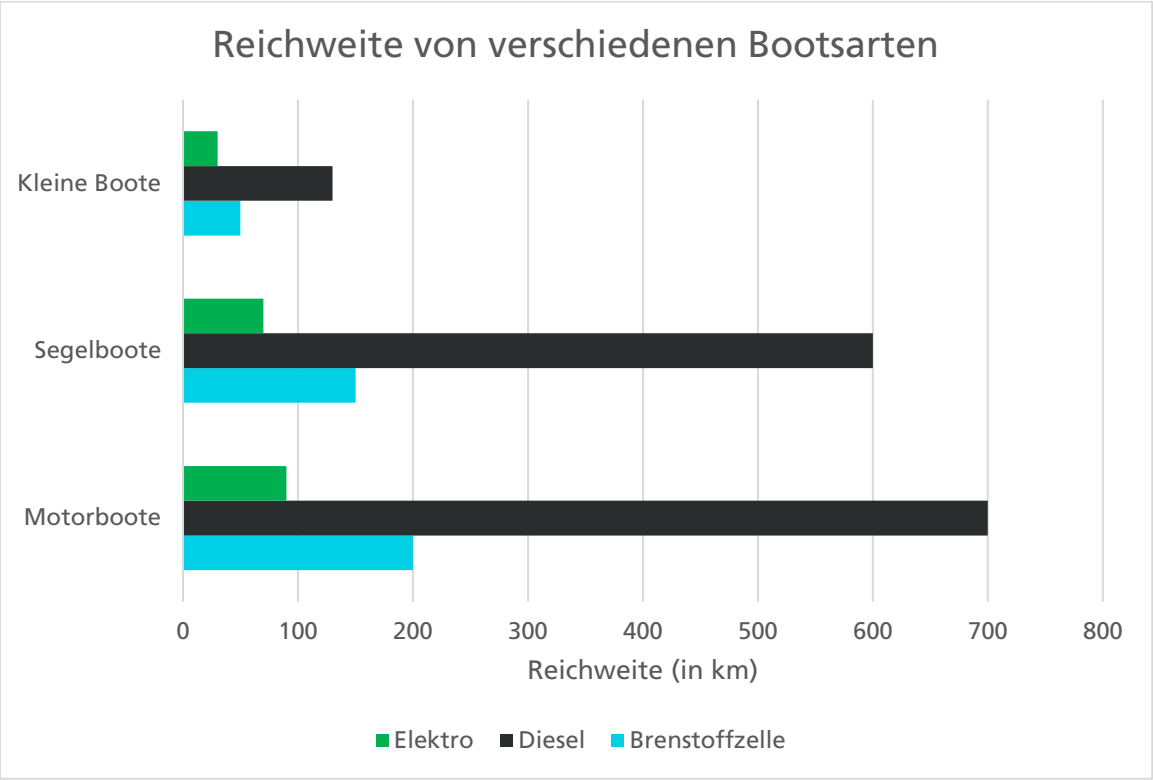


Abbildung 17: Vergleich der Reichweite je nach Antriebsart

Es zeigt sich, dass lithiumbasierte Batterietechnologien gegenüber anderen Antriebstechnologien im Nachteil sind. Ihre im Vergleich geringere Reichweite stellt ein wesentliches Hemmnis bei der Kaufentscheidung dar und viele Kunden konventionellen Technologien, insbesondere dem Dieselmotor, weiterhin den Vorzug geben. Je nach Einsatzprofil und Navigationsregionen kann jedoch nachgewiesen werden, dass Lithium-Ionen-Batterietechnologien durchaus eine sinnvolle Alternative darstellen und die begrenzte Reichweite in bestimmten Anwendungen kein entscheidender Nachteil ist.

Auch innerhalb der Elektroboote gibt es eine Vielzahl von Antriebslösungen, die alle ihre eigenen Besonderheiten haben. Es gibt viele verschiedene Arten von Antrieben, die je nach Bootstyp, Verwendungszweck und Ausstattungsniveau variieren.

	Modelle	Kapazität (kWh)	Motorleistung (kW)	Reichweite (km) @ Geschwindigkeit (km/h)	Ladeleistung
Motorboote	Axopar 25	126	222	48 @ 45	22 kW
	Frauscher 610 San Remo	18,2	15	100 @ 10	/
	Frauscher 650 Alassio	40	50	83 @ 10	/
	Frauscher 740 Mirage	80	110	60 @ 10	/
	Hwila 25	10,6	7,5	35 @ 10	1,05 kW
	Hwila 25 Long Range	21,6	7,5	70 @ 10	1,05 kW
	Laisai 20 CR	30	8	74 @ 9	3,3 kW
	Lasai 20 GL	60	30	185 @ 11	6,6 kW
	Lasai 22 GL	60	30	185 @ 11	6,6 kW
	Rand Breeze 20	15	20	55 @ 9	/
	Rand Lagune 44 Dual Motor	440	300	463 @ 11	/
	Rand Play 24	78	170	65 @ 17	/
	Rand Roamer 29	130	270	100 @ 15	/
	Rand Supreme 27	120	265	100 @ 15	/
	X Shore 1	65	120	50 @ 19	48 kW
	X Shore Eelex 8000	120	220	138 @ 19	80 kW
Segelboote	Arcona 415	19	15	/	/
	Domani 32 S	10	4	/	/
	Elan GT 6	45,6	30	/	/
	Saffier Se 24 Lite	3,5	3	/	/
	Beneteau Oceanis 30.1	10	10	/	/
Segelboote Hybrid	Contest 49/50 Hybrid (Gen 20 kw)	42,2	50	/	/

Abbildung 18: Merkmale Daten über E-Boote [19–25]

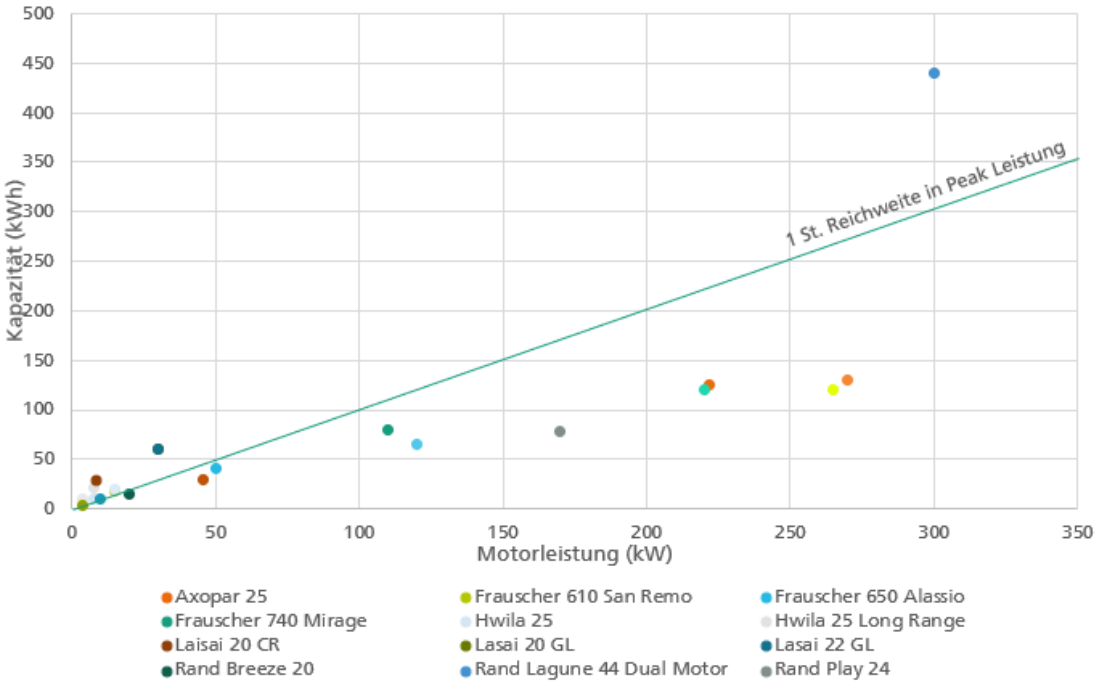


Abbildung 19: Kapazität nach Leistung für E-Booten [19–25]

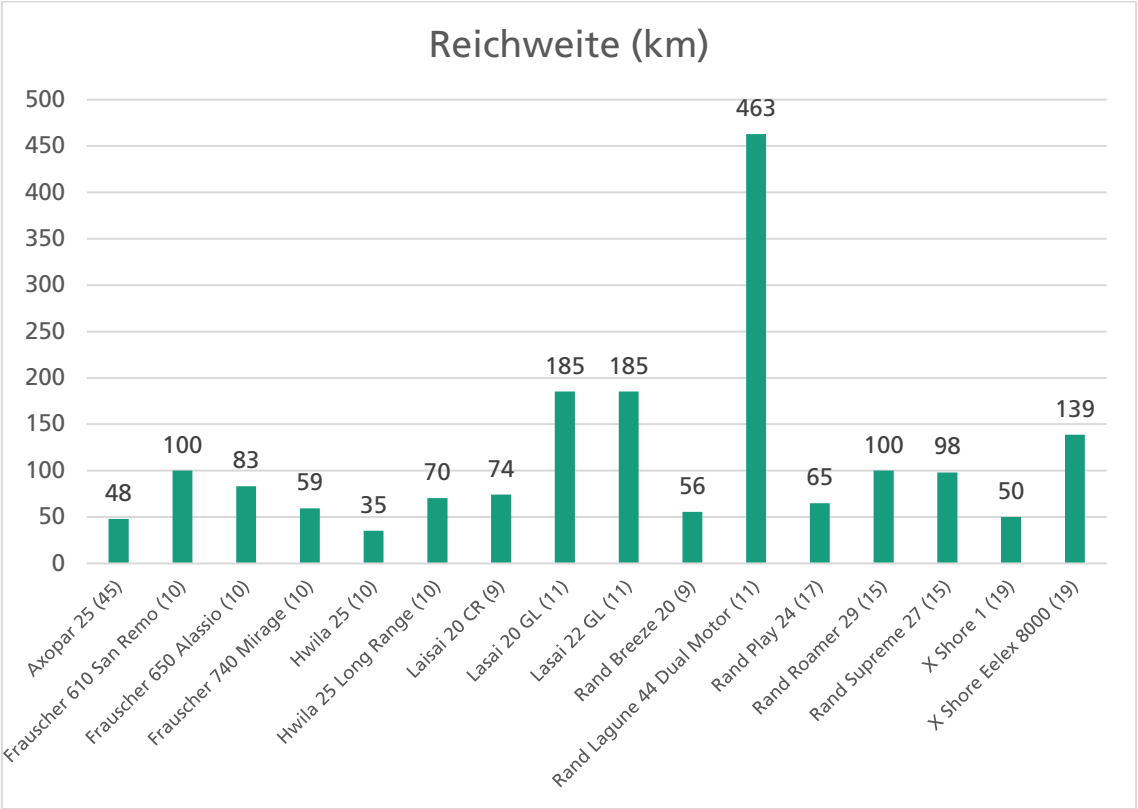


Abbildung 20: Reichweite von E-Booten (in Klammern steht die Messgeschwindigkeit in km/h) [19–24]

Segelboote haben in der Regel eine geringere Kapazität und auch eine geringere Leistung. Dies liegt daran, dass ihr Antriebssystem in der Regel nur zum Ein- und Auslaufen in den Hafen verwendet wird und nicht als Hauptfortbewegungsmittel.

Bei Motorbooten sind die Kapazitäten und die Leistung größer, aber wenn sie mit voller Kraft fahren, können ihre Batterien sehr schnell leer werden. Aus diesem Grund werden in den letzten Grafiken die Geschwindigkeiten, die zur Berechnung der Reichweite verwendet werden, von den Herstellern angegeben. Für das Beispiel der Rand Lagune 44 wird die Reichweite mit 463 km bei 11 km/h und einem Antriebssystem von 440 kWh und 300 kW angegeben. Bei einer Geschwindigkeit von 45 km/h sinkt die Reichweite jedoch auf 65 km. Es wäre also sinnvoll, die Berechnungsmethoden zu vereinheitlichen, so dass Kunden die verschiedenen Angebote leichter vergleichen können.

2.1.5. Vergleich nach Wassersportsgebiete

Die Anforderungen der Nutzer an Sportboote unterscheiden sich maßgeblich in Abhängigkeit von der jeweiligen Navigationsregion. Diese Unterschiede betreffen sowohl die Bootstypen als auch deren Größe sowie die Reichweiten- und Geschwindigkeitsanforderungen. Diese Faktoren haben einen direkten Einfluss auf die Wahl der Antriebstechnologie und deren technische Ausgestaltung. Es ist daher unerlässlich, die spezifischen Rahmenbedingungen der jeweiligen Einsatzregionen zu berücksichtigen, da diese maßgeblich darüber entscheiden, welche Technologien sich langfristig durchsetzen werden.

Binnengewässer

In Fluss- und Kanalregionen sind die Wasserstraßen in der Regel schmal und begrenzt in ihrer räumlichen Ausdehnung. Daraus ergeben sich mehrere technische und infrastrukturelle Konsequenzen:

- Aufgrund begrenzter Platzverhältnisse kommen in der Regel keine großdimensionierten Fahrzeuge zum Einsatz.
- Die Fahrtrouten sind durch das natürliche Flussbett oder die Kanalanlage eindeutig vorgegeben.
- Die zulässige Geschwindigkeit ist meist deutlich begrenzt (12 km/h), was den Energiebedarf senkt und den Einsatz elektrischer Antriebstechnologien begünstigt.
- Die Ladeinfrastruktur kann entlang der vorhersehbaren Routen effizient geplant und realisiert werden, wobei gleichzeitig auf eine mögliche Überdimensionierung geachtet werden muss, denn der Besucherandrang ist zu bestimmten Zeiten (Wochenenden, Ferien...) viel größer.
- Die Verkehrsdichte ist in diesen Bereichen tendenziell geringer als in anderen Gewässertypen.

Diese Merkmale führen dazu, dass elektrisch betriebene Antriebe, besonders in Form von Niedrigspannungssystemen (z. B. 12 V), sehr gut geeignet sind. Die klare Struktur der Fahrtrouten erleichtert zudem die Installation von Ladepunkten, wodurch planbare Ladezyklen ermöglicht werden.

Bodenseeregion

Der Bodensee stellt ein geografisch abgeschlossenes Binnengewässer dar, in dem spezifische Rahmenbedingungen herrschen:

- Es handelt sich um ein klar begrenztes Fahrgebiet mit festen Geschwindigkeits- und Leistungsgrenzen, die perspektivisch weiter verschärft werden sollen. (Zurzeit 40km/h max.[26] und 100 PS max. 300 PS möglich mit COX-Motor[10])
- Es besteht jedoch weiterhin die Möglichkeit zur Nutzung von Sportbooten, beispielsweise für Wasserskiaktivitäten, was eine höhere Leistungskapazität erfordert.
- Die maximale zurücklegbare Strecke ohne Landkontakt beträgt etwa 90 Kilometer.
- Die Anrainerstaaten Deutschland, Österreich und die Schweiz verfolgen unterschiedliche gesetzliche Regulierungen, was zu einer erhöhten Komplexität in der Infrastrukturplanung führt.
- Gleichzeitig existieren zahlreiche großflächige Marinas mit guter infrastruktureller Ausgangslage.

Insgesamt bietet die Bodenseeregion ein günstiges Umfeld für den Einsatz elektrischer Antriebssysteme, insbesondere für Segelboote und kleinere Motorboote. Aufgrund der Begrenzung von Geschwindigkeit und Strecke sowie der hohen Anzahl an Anlegemöglichkeiten eignen sich elektrische Antriebe besonders für Boote mit begrenztem Aktionsradius.

Nord- und Ostseeraum

Im Gegensatz zu Binnen- und Seegewässern handelt es sich bei der Ostsee um ein offenes maritimes Umfeld mit gänzlich anderen Herausforderungen:

- Fahrten führen über längere Strecken ohne Landkontakt, was hohe Anforderungen an Reichweite und Verlässlichkeit der Antriebssysteme stellt.
- Wetterbedingungen wie starke Winde, hoher Wellengang und plötzlich auftretende Sturmereignisse erhöhen die Herausforderungen für Boote und Bootsführer erheblich.
- In diesem Revier sind viele größere Boote, u.a. leistungsstarke Motorboote, im Einsatz.

- Die vorhandenen Marinas sind oftmals größer dimensioniert, jedoch sind die Anforderungen an deren Infrastruktur deutlich höher.

Das Wetter erschwert den Einsatz rein batterieelektrischer Antriebssysteme erheblich. Die Unsicherheit bezüglich der Rückkehrfähigkeit bei sich schnell verändernden Wetterbedingungen wirkt als Hemmnis für eine vollständige Elektrifizierung. Stattdessen gewinnen hybride Systeme oder alternative Kraftstoffe, z. B. HVO, Methanol oder E-Fuels, an Bedeutung, um eine sichere Navigation bei gleichzeitig reduzierter Umweltbelastung zu ermöglichen.

Die vorliegenden Diagramme ermöglichen einen Vergleich der Stärken und Schwächen der einzelnen Bootstypen in Abhängigkeit von ihrer Antriebstechnologie. Für jedes Bewertungskriterium gilt: Je besser die jeweilige Technologie für den spezifischen Bootstyp geeignet ist, desto höher fällt die Bewertung aus und desto weiter verschiebt sich die Netzstruktur des Diagramms nach außen. Die verschiedenen Kriterien wurden nach ihrer Bedeutung für die Käufer gewichtet.[27] Anschließend wurde jedes Antriebssystem nach den Kriterien bewertet. Dies zeigt die Stärken und Schwächen jedes Antriebs im Vergleich zu den anderen.

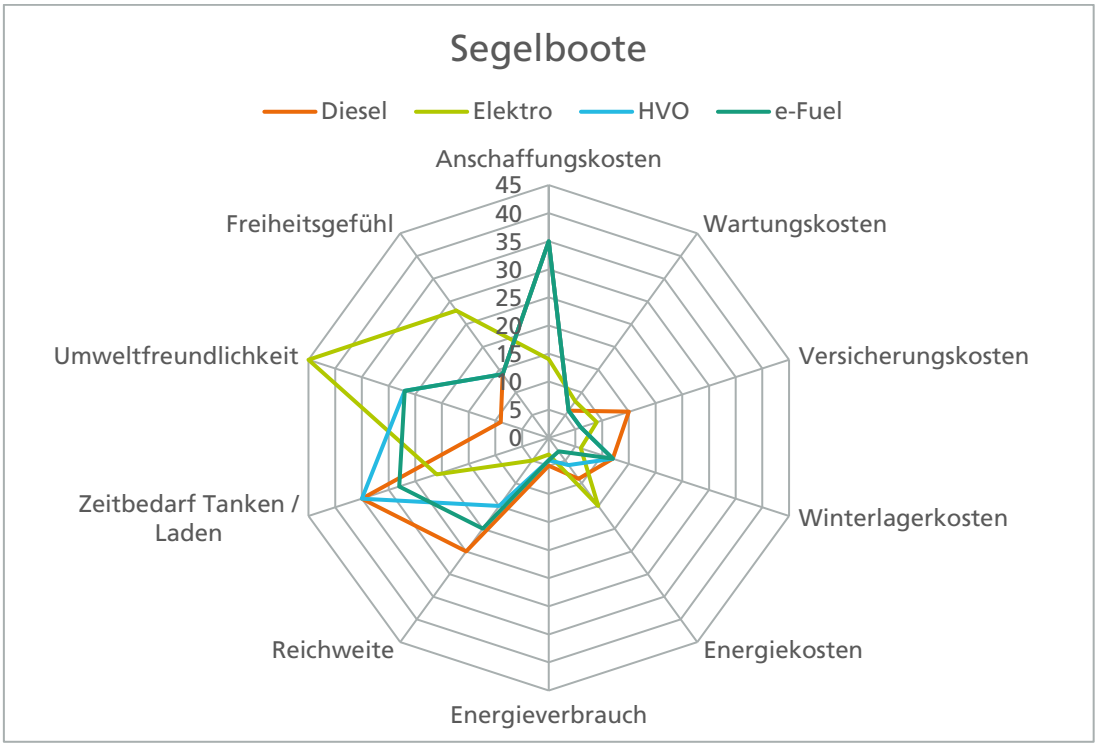


Abbildung 21: Bewertung der Eigenschaften von Segelbooten nach Antriebsarten

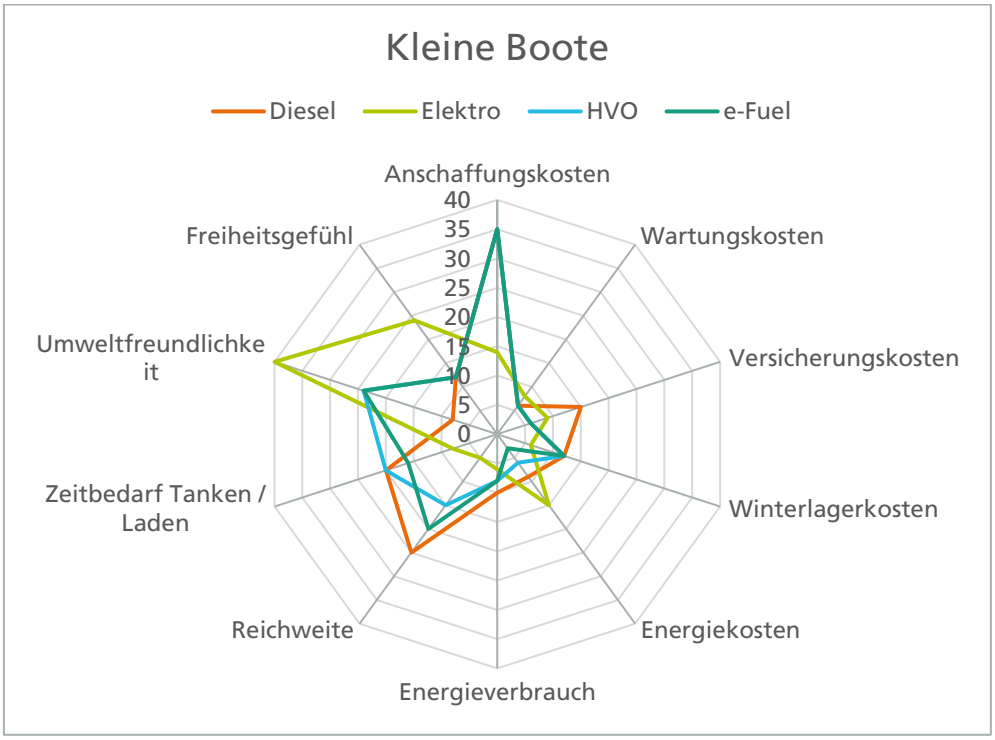


Abbildung 22: Bewertung der Eigenschaften von kleinen Booten nach Antriebsarten

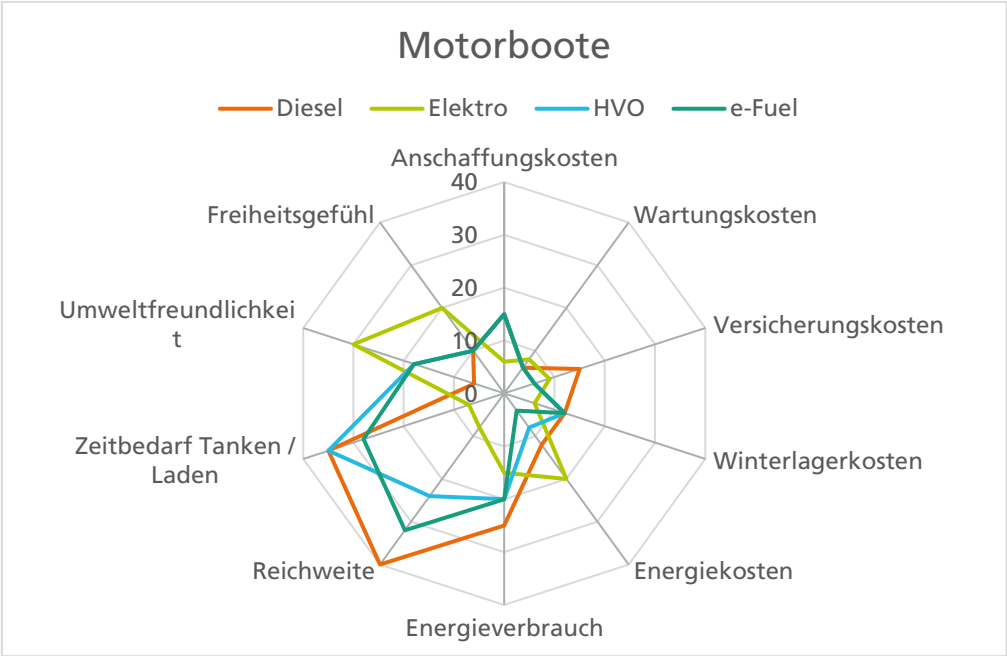


Abbildung 23: Bewertung der Eigenschaften von Motorbooten nach Antriebsarten

Wenn man die Kriterien in Bezug auf die verschiedenen Einsatzgebiete sowie die unterschiedlichen Bootstypen kombiniert, ergibt sich eine Matrix, die aufzeigt, welche Antriebsarten für welche Bootskategorie in den jeweiligen Navigationsregionen am besten geeignet sind.

	Bootsart und Antriebsart											
	Motorboot				**Segelboot**				**Jolle / Klein Boot**			
Fahrbereich	**Diesel**	**Elektro**	**HVO**	**E-Fuels**	**Diesel**	**Elektro**	**HVO**	**E-Fuels**	**Diesel**	**Elektro**	**HVO**	**E-Fuels**
Binnenwasser												
Bodensee												
Ostsee												

Legende:
sehr gut angepasst | gut angepasst | teilweise angepasst | nicht so gut angepasst | nicht angepasst

Abbildung 24: Die Einbindung von Technologien nach Booten und Gebieten

Auf Grundlage, der in diesem ersten Abschnitt durchgeführten Analysen lassen sich die Ergebnisse in dem Abbildungen zusammenfassen. Es zeigt die jeweils relevantesten Antriebstechnologien in Abhängigkeit vom Bootstyp und der Navigationsregion – stets unter dem Gesichtspunkt eines emissionsarmen Betriebs.

2.2. Marinas

2.2.1. Lademöglichkeiten

Ein Wechsel zu Elektromobilität erfordert die Bereitstellung von Ladungsmöglichkeiten. Derzeit sind die meisten Liegeplätze in Marinas mit einer 220-V-16-A-Ladung ausgestattet. Für die bestehende Bordsysteme ist diese Leistung ausreichend, aber für ein Elektroboot wird es 8 bis 10 Stunden für eine vollständige Ladung dauern. Diese Dauer gilt sowohl für die Tagesnutzung als auch für die Übernachtladung.

Elektrischen Ladesäule werden entweder mit Wechsel- oder mit Gleichstrom betrieben. Die AC-Säulen sind mit einer maximalen Leistung von 22 kW vergleichbar mit den als "Wall-Box" bezeichneten Ladestationen für Elektrofahrzeuge, die in privaten Haushalten zum Einsatz kommen. Die gängigste Ausführung verfügt gegenwärtig über eine Leistung von 11 kW. Die DC-Säulen verfügen über eine Leistung von über 50 kW. Die Ladezeit der Akkus beträgt zwischen 30 und 60 Minuten bei einer Ladeleistung von 20 bis 80 Prozent. Es ist von Relevanz, dass die maximale Ladegeschwindigkeit von Lithium-Batterien zwischen 20 und 80 Prozent liegt; darüber hinaus verlängert sich die Ladezeit erheblich. Ladesäulen sind in der Lage, bei Gleichstrom eine Leistung von bis zu 400 kW zu erreichen. In der Automobilbranche können diese Hochleistungsladegeräte die Reichweite von 100 km in weniger als 10 Minuten wiederherstellen. Mit einer Leistung von 320 kW pro Ladegerät ist ein Ladevorgang innerhalb von zwei bis drei Stunden möglich, der eine Energieaufnahme von 1 MWh aufweist. Es ist jedoch unerlässlich, die Anweisungen des Herstellers zu befolgen, da eine Leistung von 400 kW nicht für alle Batteriepacks geeignet ist und deren Antrieb beschädigen kann.

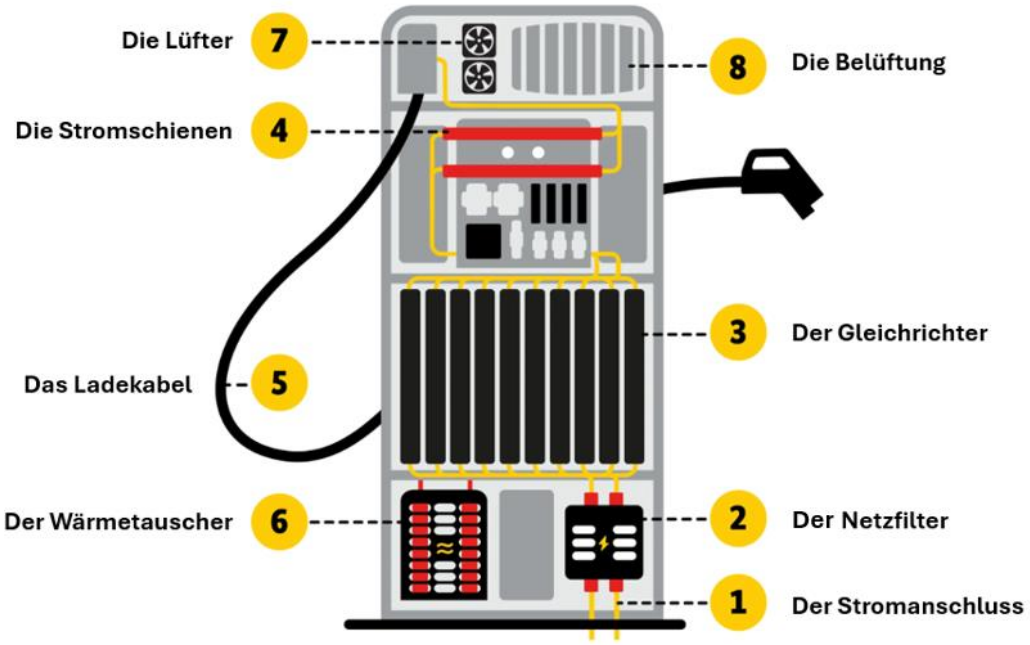


Abbildung 25: Schema einer Schnelladesäule [28]

Lithium-Ionen-Batterien benötigen zur Aufladung Gleichstrom. Aus diesem Grund ist in allen Ladesäulen ein Gleichrichter integriert, welcher den 50-Hertz Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt. Die für hohe Leistungen ausgelegten Ladesäulen sind mit einem Wärmetauscher und einem Lüfter ausgestattet, der für die Kühlung des Gerätes sorgt.

Für Speedboote sind schnelle Ladungsmöglichkeiten erforderlich, da ihre Reichweite aufgrund ihrer Geschwindigkeit und Leistung begrenzt ist. Die Bildung von Warteschlangen vor den Ladestationen kann zu gravierenden Problemen führen. Wenn jedes Boot zwei Stunden warten muss, bis es an der Reihe ist, kann das System nicht funktionieren.

Für Yachtcharter ist dies ebenfalls problematisch, da sie ihre Boote in stark frequentierten touristischen Regionen vermieten und die Marinas daher oft überlastet sind. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der Platzierung der Boote führen, insbesondere wenn die Mieter keine Wartezeit in den Häfen verlieren wollen.

Im modernen Marina Sektor findet eine zunehmende Elektrifizierung statt. Viele Liegeplätze sind heutzutage mit 220V/16A ausgestattet. Diese Kapazität ist

ausreichend, um die Stromversorgung von Segelbooten für die Nacht zu gewährleisten. Darüber hinaus stellen Schnellladesäulen eine weitere Herausforderung für Marinas dar. Einerseits sind sie kostenintensiv, andererseits müssen sie - da es bisher um Ladestationen für Autos handelt - wasserdicht sein, um die Sicherheit zu gewährleisten und die Gefahr eines Stromschlags durch Wasser (Meerwasser) zu vermeiden. Aus diesem Grund belaufen sich die Kosten für eine Hochleistungsladesäule (400v 32A oder 64A) auf einen Betrag zwischen 40 000 € und 100 000 €, abhängig von den jeweiligen Leistungsmerkmalen. Dies stellt für Marinas eine erhebliche Investition dar. Dieser Aspekt erlangt eine besondere Bedeutung, da sich aus dieser Investition zu einem späteren Zeitpunkt weitere ergeben.[10,28]

Darüber hinaus bestehen weitere Probleme im Zusammenhang mit den Ladesäulen, vor allem in Bezug auf die Zahlungsmöglichkeiten und die Kapazitäten in den Marinas. Die Zahlungsmethoden können variieren. Es besteht die Möglichkeiten, dass Kunden im Rahmen eines Abonnements, per Karte oder in bar bezahlen. Für die Einrichtung von Abonnement- und Kartenzahlungsmöglichkeiten ist die Implementierung eines Managementsystems mit einem zentralen Bezahl- oder Registrierungsterminal erforderlich. Die Implementierung, Administration und Wartung einer solchen Infrastruktur würde mit zusätzlichen Kosten verbunden sein. Eine weitere Option wäre die Bezahlung direkt an die Hafenmeisterei. Der Kunde bezahlt die benötigte Anzahl an kWh direkt an die Hafenmeisterei und lädt sein Boot im Anschluss. Diese Methode würde verhindern, dass die Kunden am Ende ihres Aufenthalts den Hafen verlassen und ihre Boote angeschlossen lassen, und sie würde es den Mitarbeitern der Marina ersparen, jene Boote zu kontrollieren.

Ein weiteres Problem stellt die begrenzte Verfügbarkeit von Platz dar, da die Yachthäfen - größtenteils in der Hochsaison - überfüllt sind. Dies kann dazu führen, dass sich an Tagen mit hohem Andrang eine Warteschlange an den Ladesäulen bildet und den Aufenthalt der Bootsfahrer beeinträchtigt. Zudem ist die Installation einer schnellen Ladesäule in Marinas mit begrenztem Platzangebot mit Schwierigkeiten verbunden. Es wird daher empfohlen, dass die Marinas zunächst einen neuen Ladeponton für stationären schnellen Ladesäulen errichten. Die Wartezeit beim Laden ist jedoch länger als beim Nachfüllen von Diesel oder Benzin, sodass eine Kombination aus Ladebrücke und Ponton mit einer begrenzten Anzahl der Zapfsäule nur für eine kleine Nachfrage geeignet ist. Dies resultiert in einer längeren Wartezeit für Kunden, die ihren Tank füllen möchten.[10]

Eine Moglichtkeit besteht darin, dass die Ladestation sowohl für PKWs und LKWs als auch Sportboote ausgelegt wird. Wenn mehrere Sportboote mit größeren Systemen gleichzeitig aufladen wollen (z.B. am Ende des Tages).

Gegenwärtig bieten einige Unternehmen die Installation von Ladestationen für Boote an. Die Marina muss lediglich einen Standort bereitstellen und die Kosten für den Stromverbrauch der Ladesäule tragen. Die Einrichtung, Wartung und Verwaltung der Ladestationen erfolgt durch das Unternehmen mittels eines Abonnement-Systems, wobei der Gewinn aus dem Stromverkauf an die Kunden, die ihr Boot aufladen, beim Unternehmen verbleibt. Dies hat den Vorteil, dass die Marinas nicht zu hohe Investitionen tätigen müssen und die Anzahl der Ladestationen schneller wächst.[29]

2.2.2. Stromversorgung

Die Bereitstellung elektrischer Energie in deutschen Yachthäfen erfolgt mittels Verteilungseinrichtungen, die sich an den Kais oder Stegen der Yachthäfen befinden. Diese Terminals generieren in der Regel 230 V Wechselspannung (AC) für kleinere Wasserfahrzeuge und 400 V für größere Boote. In einige Häfen werden zunehmend automatisierte Zahlungssysteme eingesetzt, die es den Bootsfahrern ermöglichen, die Stromversorgung über RFID-Karten, mobile Anwendungen oder Prepaid-Zähler zu aktivieren.

Da deutsche Häfen strengen Sicherheitsvorschriften unterliegen, müssen die elektrischen Anlagen der Norm DIN VDE 0100-709 entsprechen, welche elektrische Anlagen in maritimen Umgebungen regelt. Hierzu zählen Überspannungsschutz, Fehlerstromschutzschalter und eine wirksame Erdung, welche gemeinsam dazu dienen, die Gefahr eines Stromschlags in Feuchtgebieten zu verhindern.

Eine Elektrifizierung der Mobilitätsmittel führt zu einem Anstieg des Stromverbrauchs. Die Marinas befinden sich jedoch häufig in beträchtlicher Entfernung zu Hochleistungsstromnetzen, was zu einer suboptimalen Stromversorgung führt. Dies kann zu technischen Herausforderungen (Wechselrichter und Leitungen) führen, da die Ladestationen einen erheblichen Stromverbrauch aufweisen. Einige Marinas haben nicht immer ausreichende Strominfrastruktur, was wiederum die Aktivierung des Sicherungsautomaten zur Folge hat. Das bedeutet, dass das Netz überlastet wird und es immer wieder zu Stromausfällen kommt. Die Effizienz der Elektrifizierung kann demnach nur durch die Behebung dieses Problems gewährleistet werden.

Die niederländischen Behörden erarbeiten derzeit Lösungen, um das Problem der Stromversorgung von Marinas zu beheben. Die Yachthäfen benötigen nicht nur leistungsfähigere, sondern auch intelligentere Grid-Systeme, um die Anfangsinvestitionen zu senken. Dies impliziert die Renovierung und den Ausbau der bestehenden Infrastruktur, in erster Linie die Installation einer Verkabelung, die einen höheren Stromtransport zu den Marinas ermöglicht und Trafos/Wechselrichter mit einer höheren Leistung. Zudem sind auch saubere Lösungen, die den Strom vor Ort erzeugen (Solarpaneele, Wind Turbine), zu berücksichtigen. Eine Steuerung der Stromverteilung innerhalb des Yachthafens ist dabei von grundlegender Bedeutung. Dieses System können steuern, welche Boote vorrangig geladen werden, und zwar abhängig von der Anzahl der Besucher und dem Bedarf der einzelnen Eigentümer.[10]

Eine alternative Option wäre die Implementierung von Stromspeichern, die aus Batterien bestehen. In Phasen eines erhöhten Strombedarfs besteht die Möglichkeit, dass diese Speicher die Lücke schließen, insbesondere im Kontext der simultanen Ladung mehrerer Elektroboote. Es existieren bereits Speicher, die den spezifischen Bedingungen auf See angepasst sind. Sie können einen signifikanten Beitrag zur Energieeffizienz leisten, indem sie die für Schnellladestationen erforderliche Energie speichern und wieder abgeben. Die Realisierung eines Speichers würde folglich die Möglichkeit bieten, die Leistung an den Schnellladestationen zu erbringen, ohne dabei die für den Betrieb des Marina erforderliche Leistung des Stromnetzes zu beeinträchtigen.

2.2.3. Tankmöglichkeiten

Die Entwicklung neuer Kraftstoffe ist eine vielversprechende Maßnahme zur Reduktion der CO2-Emissionen im Wassersport. Es bedarf jedoch weiterer Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen, um die Motoren und Kraftstoffe so zu modifizieren, dass sie in den Yachthäfen zum Einsatz kommen können. Darüber hinaus sind Lösungen zu erarbeiten, die eine vergleichbare einfache Betankung ermöglichen, wie sie bei Diesel und Benzin bereits besteht.

Biodiesel weist die gleiche Lagerfähigkeit auf wie Dieselkraftstoff und kann daher in identischer Weise, das heißt unter atmosphärischem Druck und bei konstanter Temperatur, gelagert werden. In FAME finden sich Mikroorganismen, die bestimmte Moleküle aus dem Treibstoff verstoffwechseln können. Diese Bakterien erzeugen in den Kraftstoffen Säure und Wasser, die sehr gefährlich für Motoren sind. Um diese Biocytes

zu vermeiden, darf der Kraftstoff nicht zu lang gelagert werden - 6 Monate für konventionelle Diesel und 3 Monate für FAME. Es wird empfohlen, regelmäßig einen Rancimat-Test durchzuführen, um den Oxidationszustand des Treibstoffs zu überprüfen. HVO hingegen kann nicht auf diese Weise oxidiert werden und hat einfachere Lagerungsbedingungen.

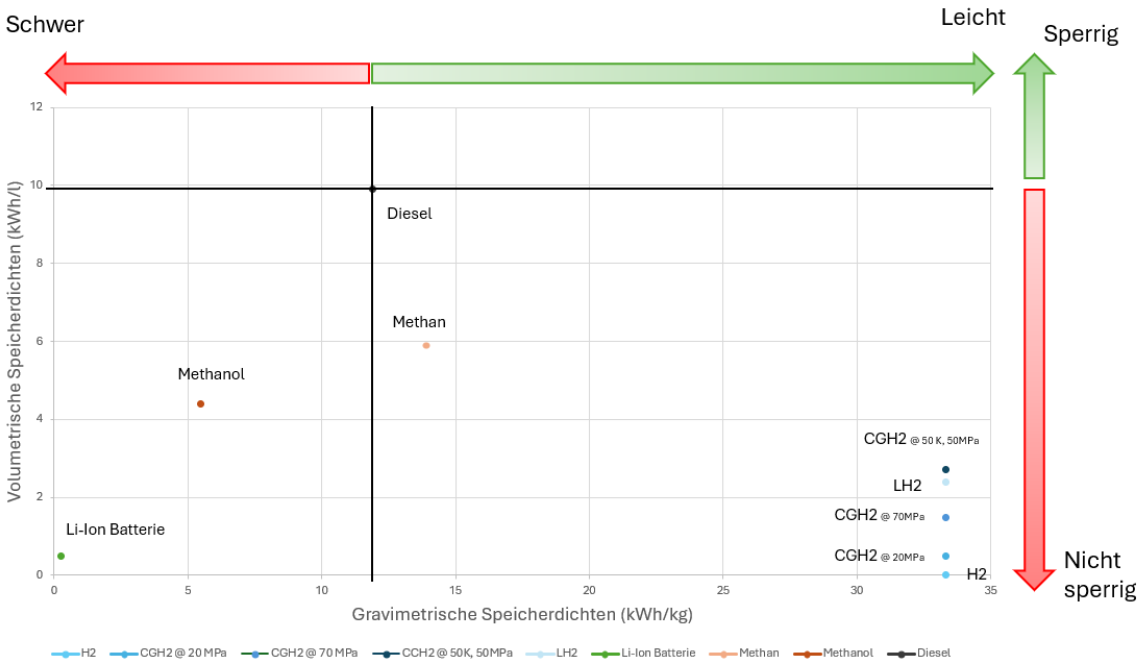


Abbildung 26: Relative Speicherdichten im Vergleich zu Diesel [15,17]

Die vorliegende Grafik veranschaulicht, dass Dieselkraftstoff einen ausgewogenen Kompromiss zwischen der Energiedichte des Kraftstoffs und dem hohen Platzbedarf bietet, der für andere Kraftstoffe charakteristisch ist. Batterien sind demnach schwerer als Diesel bei gleicher Energie. Methanol weist den Vorteil auf, dass es als konventionelle Kraftstoffe gelagert werden kann.

Methan und Wasserstoff haben im Vergleich zu Diesel eine geringere Volumetrische Energiedichte, daher ist ein größeres Kraftstoffvolumen erforderlich, um eine vergleichbare Energiekapazität in einem Tank zu erreichen. Beim atmosphärischen Druck und Temperatur sind diese beiden Kraftstoffe gasförmig und bedürfen daher einer Komprimierung und/oder Kryogenisierung, um das Volumen des Kraftstoffs in einer bestimmten Masse zu erhöhen. Die Kryogenisierung und die Komprimierung sind energieintensiv, was die Energieeffizienz des Lagerungsprozesses negativ beeinflusst.

Zudem ist Wasserstoff aufgrund seiner geringen molekularen Größe und Entzündbarkeit mit einem hohen Risiko verbunden, was die Lagerung des Stoffs zusätzlich erschwert.

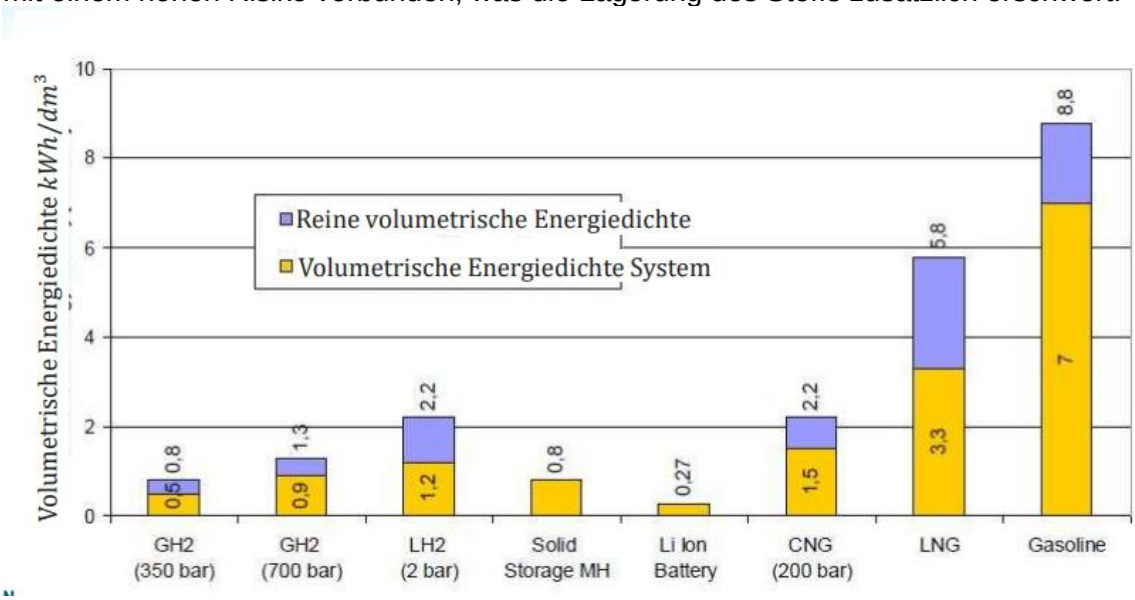


Abbildung 27: Reine und Systemische Energiedichte für Kraftstoffe[17]

Obwohl bereits Lösungen für die Nutzung von gasförmigen Kraftstoffen in Automobilen existieren, gestaltet sich das Angebot dieser Kraftstoffe an Tankstellen als problematisch. Experten empfehlen daher den Einsatz von Kartuschen anstelle von Tankstellen für gasförmige Kraftstoffe.[10] In diesem Fall würde ein Austausch der Kartusche erfolgen, anstatt das Fahrzeug zu tanken. Diese Kartuschen werden im Anschluss erneut verwendet. Es bestehen jedoch noch Unklarheit in Bezug auf die Normen der Kartusche (standardisierte Formen und Menge, Volumen), die Lieferkette, die Versicherung der Lagerung in den Marinas und in den Booten.

	Diesel	Wasserstoff	E-Fuels	HVO100	Strom
Preis (€/kWh)	0,18	0,47	0,36	0,22	0,65

Abbildung 28: Vergleich von Energiepreisen [30–34]

2.2.4. Auswirkungen der neuen Technologien auf die Marinas und Charterbetreiber

Das Annahme neuer Antriebstechnologien wird den Markt für Freizeitschifffahrt erheblich beeinflussen. Insbesondere Marinas sehen sich in der Pflicht, ihre Infrastruktur an die sich wandelnden Anforderungen anzupassen. Dies betrifft vor allem den Bereich der Energieversorgung, dessen technische Umsetzung mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Daher sollte das Angebot der Marinas in Einklang mit den tatsächlich vor Ort genutzten Bootstypen sowie deren spezifischen Energiebedarfen stehen.

Abhängig von der geografischen Lage und den Nutzungsmustern müssen Marinas gezielte Investitionen tätigen, um den Herausforderungen der Elektrifizierung und Dekarbonisierung gerecht zu werden. Die Anforderungen variieren dabei stark je nach Region. In Binnengewässern sowie im Bodenseeraum sollten vorrangig Standardladesäulen installiert werden, wobei deren Anzahl bedarfsgerecht auf die Anzahl der Kunden und Liegeplätze abzustimmen ist. Gleichzeitig bedarf es der Entwicklung nutzerfreundlicher und transparenter Zahlungssysteme, um die Akzeptanz und Nutzung der Ladeinfrastruktur zu fördern.

In stark frequentierten maritimen Gebieten wie dem Bodensee und der Ostsee wird überdies der Ausbau von Schnellademöglichkeiten an Bedeutung gewinnen. Hier sind leistungsfähige DC-Ladestationen nötig, um die begrenzte Verweildauer der Boote an den Liegeplätzen effizient zu nutzen.

Ein weiterer Handlungsschwerpunkt besteht in der Bereitstellung alternativer Kraftstoffe. Zunächst sollten Marinas auf die Integration von Biokraftstoffen setzen, die bereits in bestehende Verbrennungssysteme eingespeist werden können. Langfristig kann die Einführung synthetischer E-Fuels als Ergänzung erfolgen, sobald diese in ausreichender Menge und zu wirtschaftlichen Bedingungen verfügbar sind.

Diese Maßnahmen stellen für die Betreiber eine strategische Entscheidung dar, deren Umsetzung nicht nur technisches Know-how, sondern auch eine enge Abstimmung mit politischen Förderprogrammen und regulatorischen Rahmenbedingungen erfordert.
Insbesondere ist eine Investition nötig, was nur rentieren kann, wenn es eine Nachfrage für den Strom oder alternative Kraftstoffe gibt. Das ist nicht nur auf dem Kosten abhängig, sondern auch auf die Verfügbarkeit der Infrastruktur, so dass den Betrieb für die Kunden immer noch attraktiv ist.

Die vorliegenden Diagramme ermöglichen einen Vergleich der Stärken und Schwächen der einzelnen Antriebsystemen in Abhängigkeit von ihrer Fahrtgebiet. Für jedes Bewertungskriterium gilt: Je besser die jeweilige Technologie für den spezifischen Bereich geeignet ist, desto höher fällt die Bewertung aus und desto weiter verschiebt sich die Netzstruktur des Diagramms nach außen. Die verschiedenen Kriterien wurden nach ihrer Bedeutung für die Marinas gewichtet.[10] Anschließend wurde jedes Antriebssystem nach den Kriterien bewertet. Dies zeigt die Stärken und Schwächen jedes Antriebs im Vergleich zu den anderen und wie sehr sie an die Besonderheiten der jeweiligen Gebiete angepasst sind

Binnengewässer

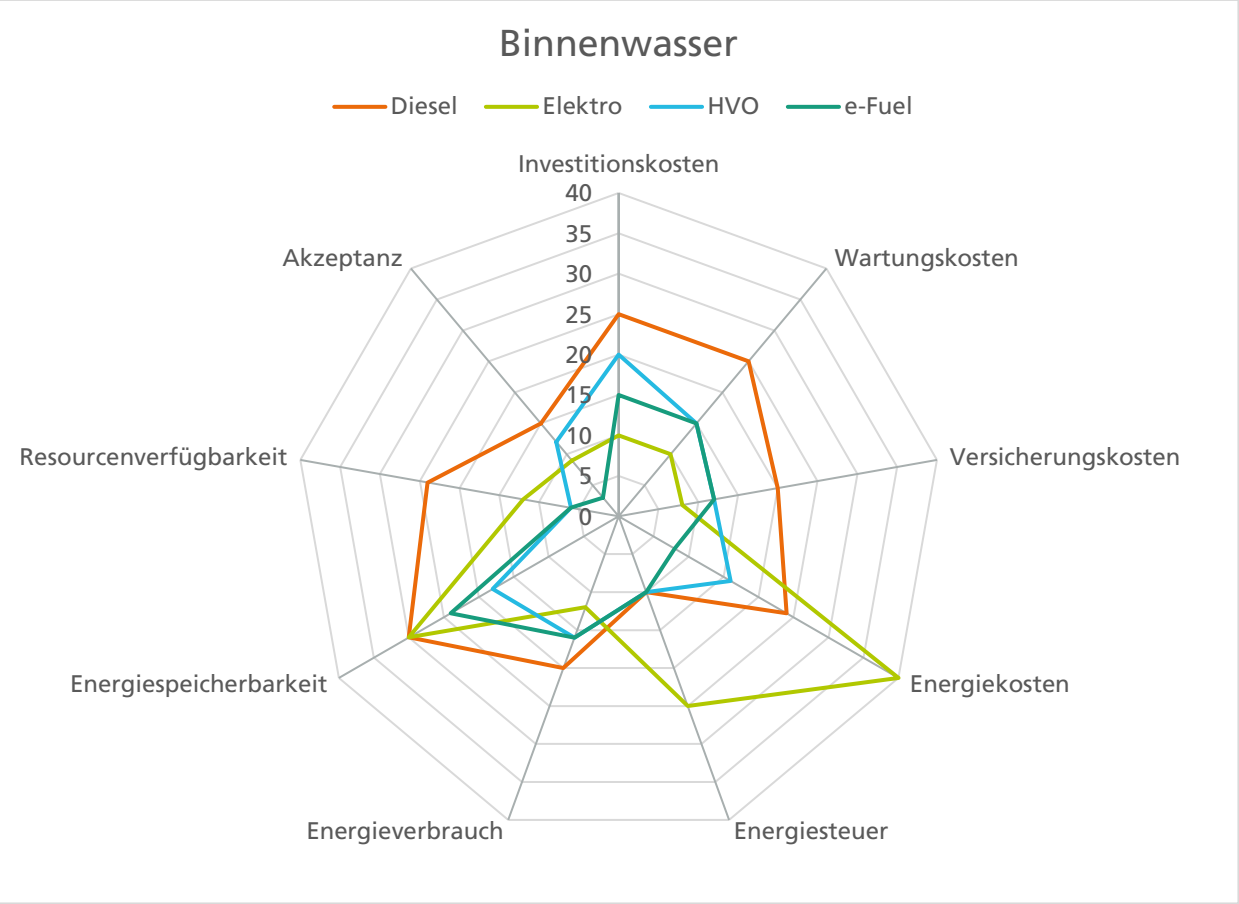


Abbildung 29: Kriterien für Binnenwasser-Gebiete nach Antriebsarten

Binnengewässer bieten aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften ein besonders günstiges Umfeld für den Einsatz elektrischer Antriebssysteme. In diesen Regionen dominieren kleine und leichte Boote, die keine hohen Geschwindigkeiten erreichen

müssen. Daher ist der Energiebedarf gering, was den Einsatz von Niederspannungssystemen technisch und wirtschaftlich sinnvoll macht.

In der Regel werden die Boote in diesen Gewässern lediglich für Tagesausflüge genutzt. Aus diesem Grund besteht keine Notwendigkeit für die Installation von Schnellladesystemen, da eine herkömmliche Übernachtladung am Liegeplatz ausreicht.

Darüber hinaus beschränken sich die Fahrzeiten auf maximal vier bis fünf Stunden pro Tag, was eine ausreichende Reichweite mit einfachen Batteriesystemen ermöglicht. Diese Rahmenbedingungen machen Binnengewässer zu idealen Pilotregionen für die Einführung und Etablierung elektrischer Antriebstechnologien im Freizeitsektor.

Bodenseebereich

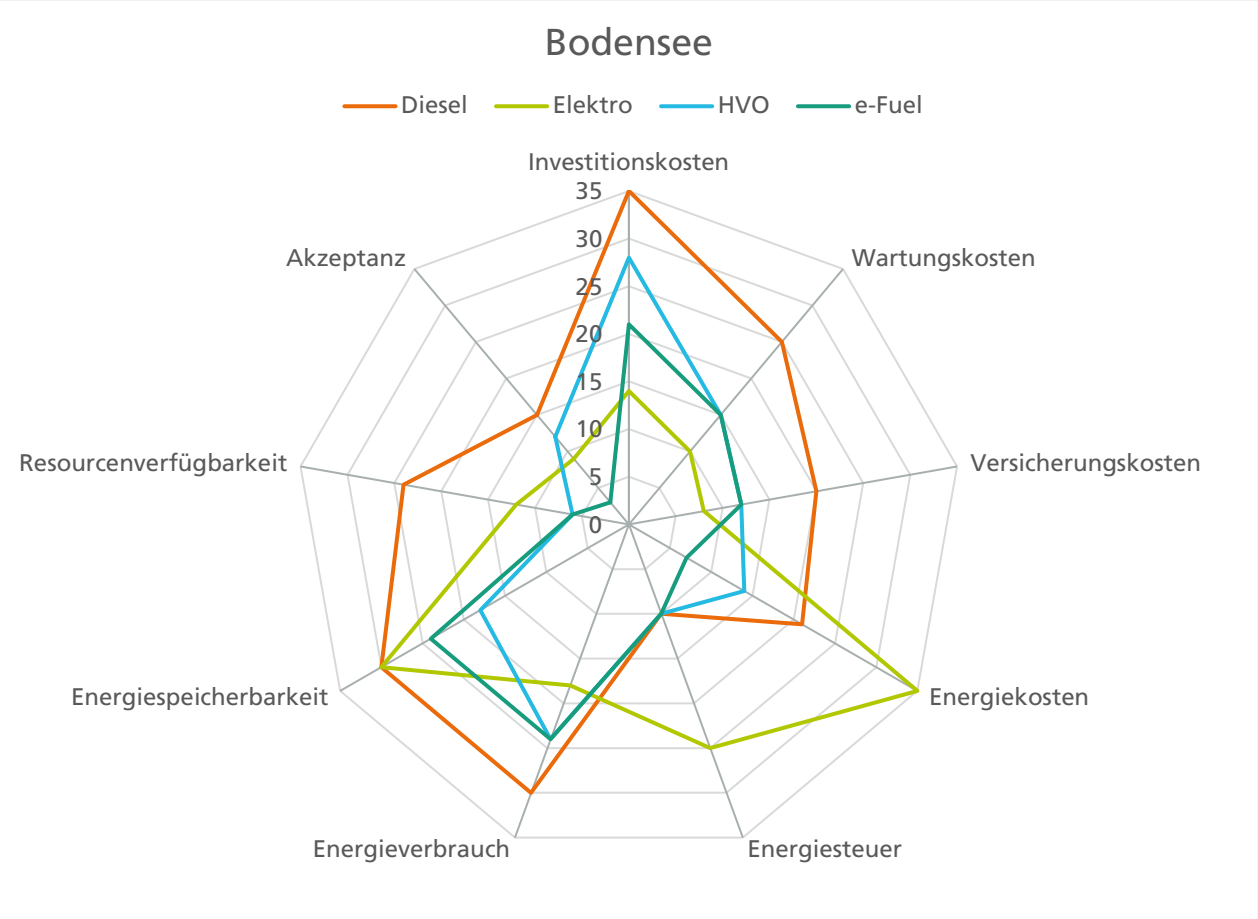


Abbildung 30: Kriterien für Bodensee-Gebiete nach Antriebsarten

Die Struktur des Bodensees erlaubt eine differenzierte Herangehensweise an die Elektrifizierung der Schifffahrt. Für Segelboote bietet sich der elektrische Antrieb in besonderem Maße an, da sie überwiegend durch Windkraft fortbewegt werden und somit nicht auf große Reichweiten des Motors angewiesen sind. In diesen Fällen dient der Elektromotor primär als Hilfsantrieb für Hafenmanöver oder für kurze Strecken bei Windstille. Der Energiebedarf bleibt entsprechend gering, wodurch eine Ladung über Nacht an herkömmlichen Landanschlüssen in der Regel ausreichend ist.

Auch kleinere Motorboote können mit elektrischen Antrieben betrieben werden, insbesondere wenn sie für kurze Tagesausflüge genutzt werden. Die vorhandene Ladeinfrastruktur in den Marinas – oft basierend auf Normalladung (z. B. 230 V mit 16 A) – genügt in vielen Fällen, um den täglichen Energiebedarf zu decken.

Bei leistungsstärkeren Wasserfahrzeugen wie Speedboote, die etwa für Wasserski genutzt werden, sowie bei gewerblich genutzten Booten, steigen die Anforderungen jedoch signifikant. Diese Fahrzeuge benötigen entweder eine Schnellladeinfrastruktur – idealerweise auf DC-Basis mit hoher Ladeleistung – oder den Zugang zu alternativen Kraftstoffen. Besonders Biokraftstoffe und E-Fuels bieten sich hier als Übergangslösungen an, da sie mit bestehenden Verbrennungsmotoren kompatibel sind und dennoch zur Emissionsreduktion beitragen.

Insgesamt zeigt sich, dass am Bodensee keine universelle Lösung zur Elektrifizierung aller Bootstypen existiert. Vielmehr erfordert der technologische Wandel eine typenspezifische Betrachtung und eine flexible Infrastruktur, die sowohl elektrische als auch alternative Antriebskonzepte unterstützt.

Nord- Ostseebereich

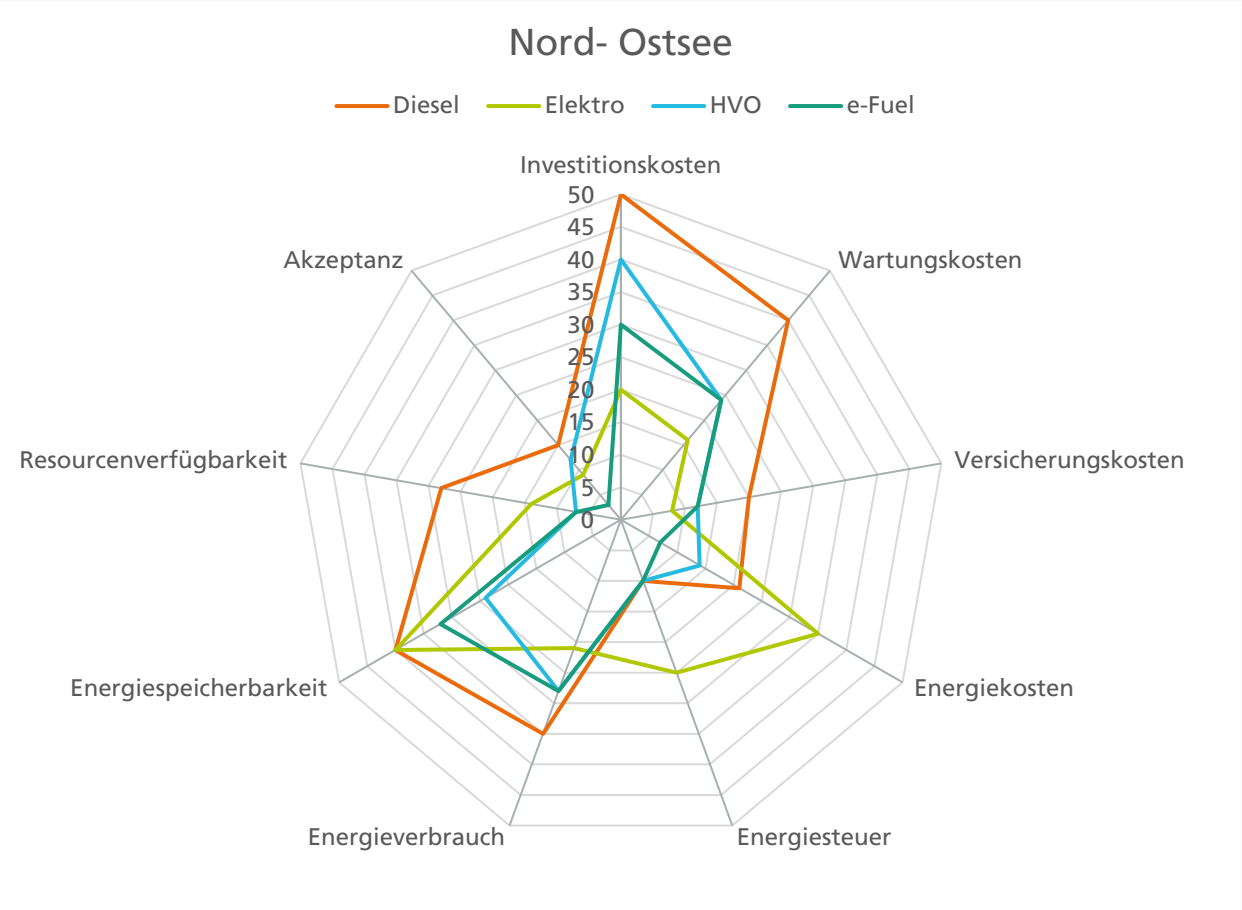


Abbildung 31: Kriterien für Nord- Ostsee-Gebiete nach Antriebsarten

Im maritimen Umfeld der Nord- und Ostsee sind die technischen und operativen Anforderungen an Antriebssysteme erheblich höher als in Binnengewässern. Dies betrifft vorwiegend motorisierte Sportboote, die auf eine hohe Reichweite und zuverlässige Rückkehrsicherheit angewiesen sind. Aufgrund wechselhafter Wetterbedingungen, längerer Distanzen ohne Landkontakt und häufig fehlender Ladeinfrastruktur ist der Einsatz batterieelektrischer Antriebe derzeit nur eingeschränkt realisierbar. Die potenziellen Risiken, hauptsächlich im Hinblick auf das Erreichen eines sicheren Hafens bei Wind und Wellengang, stehen einer breiten Elektrifizierung motorisierter Einheiten entgegen.

Für Segelboote hingegen bieten sich elektrische Antriebe prinzipiell an, allerdings vornehmlich für kürzere Strecken und innerhalb geschützter Küstenbereiche. Sobald längere Distanzen oder internationale Routen geplant sind, stoßen elektrische Systeme

auch hier an ihre Grenzen, da die benötigte Speicherkapazität nur mit erheblichem Platz- und Gewichtszuwachs realisierbar wäre.

Vor diesem Hintergrund bevorzugen viele Nutzer im Nord- und Ostseeraum den Einsatz alternativer Kraftstoffe, insbesondere biogener oder synthetischer Varianten wie HVO oder E-Fuels. Diese Kraftstoffe können in bestehenden Verbrennungssystemen genutzt werden und bieten eine praktikable Lösung zur Emissionsreduktion ohne grundlegende Umrüstung der Technik.

Im Segment des Yachtcharters gestaltet sich die Integration emissionsarmer Antriebe bislang sehr schwierig. Die Nachfrage nach elektrisch betriebenen Booten ist in diesem Bereich äußerst gering. Kunden legen großen Wert auf ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis und erwarten maximale Flexibilität und Reichweite. Elektrische Systeme können diese Erwartungen derzeit nur eingeschränkt erfüllen, speziell angesichts der noch begrenzten Ladeinfrastruktur entlang der Küstenlinien. Viele Kunden verharren bewusst in der Nutzung konventioneller Systeme und warten ab, bis sich praktikable Alternativen etabliert haben.[10]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Nord- und Ostseeraum eine Elektrifizierung der Sportbootflotte mittelfristig nur in ausgewählten Anwendungsfeldern realisierbar ist. Alternative flüssige Kraftstoffe stellen derzeit die am ehesten umsetzbare Dekarbonisierungsoption für diese Regionen dar.

3. Regulatorische Aspekte und Standards

3.1. Antriebe

3.1.1. Sicherheitsaspekte

Trotz der vielversprechenden Potenziale neuer Antriebstechnologien zur Reduktion von Emissionen in der Freizeitschifffahrt, erfolgt die Entwicklung adäquater regulatorischer Rahmenbedingungen und technischer Standards häufig nicht in gleichem Tempo. Diese Diskrepanz erschwert nicht nur die Einführung innovativer Technologien, sondern birgt auch erhebliche sicherheitstechnische Risiken. Besonders in den Bereichen der Zertifizierung, infrastrukturellen Anpassung sowie der sicherheitstechnischen Absicherung bestehen derzeit noch signifikante Defizite, die einer breiten Marktdurchdringung im Wege stehen.

Akteure wie Bootshersteller, Marinas und Versicherungsunternehmen stehen gleichermaßen vor der Herausforderung, technologische Neuerungen in bestehende Systeme zu integrieren, ohne dabei das hohe Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gefährden, das in der Seeschifffahrt unerlässlich ist. In diesem Kontext analysiert die vorliegende Untersuchung die aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen sowie geltenden technischen Normen im Hinblick auf emissionsarme Antriebe bei Sportbooten. Dabei werden ausdrücklich die sich daraus ergebenden Herausforderungen und Perspektiven für die Branche systematisch aufgearbeitet.

Ein zentrales sicherheitstechnisches Risiko stellt gegenwärtig die Brandgefahr dar, die mit der Nutzung neuer Antriebstechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien oder Wasserstoffspeichersystemen einhergeht. Der sogenannte „thermische Durchgeh-Effekt“ (thermal runaway) bei Lithium-Ionen-Batterien ist besonders kritisch: Bereits ein Kurzschluss in Elektrolyten kann zu einer unkontrollierten Entzündung führen. Die daraus resultierenden Brände sind schwer zu löschen, langanhaltend und setzen hochtoxische Gase frei. Da bisher keine integrierten Brandschutzmittel in den Batteriesystemen vorhanden sind, liegt die Hauptverantwortung beim Batterie-Management-System (BMS), welches idealerweise bereits im Vorfeld eines Brandes den Betrieb unterbrechen soll. Bei Wasserstoff besteht das Problem darin, dass dieses Element einen sehr weiten Entzündungsbereich aufweist. Wasserstoff kann sich bereits entzünden, wenn seine Konzentration in der Luft zwischen 4 und 75 Prozent liegt. Zum Vergleich: Methan hat einen Entzündungsbereich zwischen 5 und 14 Prozent Methan in der Luft.

Um die potenzielle Freisetzung gefährlicher Gase zu verhindern, verfolgen einige Hersteller das Konzept der Kapselung der gesamten Antriebseinheit. Darüber hinaus werden derzeit innovative Löschmethoden wie der Einsatz spezieller Schäume erprobt, die eine frühzeitige Eindämmung von Bränden ermöglichen sollen. Sollte sich diese Technologie als zuverlässig erweisen, könnte sie mit geringem technischen und finanziellen Aufwand in Sportboote integriert werden.[10]

Ein weiteres Spannungsfeld ergibt sich aus den derzeit nicht differenzierten Zertifizierungsanforderungen für Hoch- und Niederspannungssysteme. Der Unterschied zwischen 12-V-Systemen (typisch für kleinere Boote) und 400-V-Schnellladesystemen (für leistungsstärkere Anwendungen) spiegelt sich bislang nicht in spezifischen Regularien wider. Unabhängig davon gelten sowohl für Binnengewässer als auch für Anwendungen auf hoher See dieselben sicherheitstechnischen Regelungen – obwohl sich die Risiken im Notfall, insbesondere im Falle eines Brandes, signifikant unterscheiden können.

Angesichts dieser Problematik fordern Branchenvertreter zunehmend eine Weiterentwicklung und Präzisierung bestehender Normen. So stehen Regelungen zur Notabschaltung, zur sicheren Lagerung von Batterien sowie zur Integration effizienter Brandschutzsysteme in Booten dabei im Fokus. Erste Schritte in Richtung Standardisierung wurden auf internationaler Ebene bereits eingeleitet, unter anderem durch die Entwicklung neuer ISO-Normen für Lithium-Ionen-Batterien und elektrische Anlagen auf Wasserfahrzeugen. Jedoch schreitet der Normierungsprozess bislang deutlich langsamer voran als die technologische Entwicklung.

3.1.2. Standards bei Bootsbau

Der Bau von Sportbooten unterliegt innerhalb der Europäischen Union der CE-Zertifizierungspflicht gemäß der Richtlinie 2013/53/EU. Für Wasserfahrzeuge bis zu einer Rumpflänge von 24 Metern ist die Konformitätsbewertung verpflichtend. Größere Boote sind bisher von einheitlichen europäischen Vorschriften weitgehend ausgenommen, was angesichts der zunehmenden Integration neuer Antriebstechnologien sicherheitstechnische und regulatorische Risiken birgt.

Aktuell bestehen keine differenzierten Zertifizierungsanforderungen in Bezug auf Bootstyp oder Fahrgebiet. So gelten für motorisierte Wasserfahrzeuge dieselben Normen, unabhängig davon, ob diese auf Binnengewässern, Kanälen oder im küstennahen Bereich eingesetzt werden. Ebenso existieren keine Abgrenzungen

hinsichtlich der Anforderungen an verschiedene Bootskategorien wie Segel- oder Motorboote gleicher Größe.

Für Elektroantriebe existieren im Rahmen der CE-Richtlinie bislang keine spezifischen Zusatzanforderungen. Zwar müssen Komponenten wie Elektromotoren oder Batteriemanagementsysteme (BMS) grundsätzlich CE-konform sein, jedoch bleiben zentrale sicherheitsrelevante Aspekte wie die Verkabelung, die Systemintegration und die chemische Zusammensetzung der Batteriezellen bisher unreguliert. Dies ist besonders kritisch, da unterschiedliche Zellchemie bei Lithium-Ionen-Batterien ein erheblich abweichendes Risikopotenzial hinsichtlich thermischer Instabilität und Brandgefahr aufweisen.

In der industriellen Praxis verfolgen Werften und Antriebhersteller unterschiedliche Ansätze: Während einige Hersteller vollständige Systemlösungen anbieten – inklusive Motor, Batterie, BMS und Steuerungseinheit aus eigener Hand – setzen andere auf die Kombination von Komponenten verschiedener Zulieferer. Letzteres kann zu sicherheitsrelevanten Diskrepanzen führen, vor allem im Bereich der Verkabelung, der elektrischen Absicherung sowie der Kommunikation zwischen Teilsystemen. Eine fehlende Standardisierung begünstigt potenzielle Fehlanpassungen oder Unterdimensionierungen, die im schlimmsten Fall zu kritischen Systemfehlern führen können.

Besonders hervorzuheben ist die Problematik des Brandschutzes bei Lithium-Ionen-Batterien. Diese stellen derzeit die am weitesten verbreitete Energiespeichertechnologie für Elektroboote dar. Im Falle eines internen Kurzschlusses kann es zum sogenannten „thermal runaway“ kommen – ein sich selbst verstärkender Erwärmungsprozess, der in der Regel nicht mehr gestoppt werden kann. Da Lithium-Brände schwer zu löschen sind und hochtoxische Gase freisetzen, besteht dringender Handlungsbedarf hinsichtlich spezifischer Schutzmechanismen. Aktuelle Systeme verfügen über kein aktives Brandschutzmittel im Batteriepaket selbst; vielmehr liegt die Verantwortung bei der Steuerung durch das BMS, das im Idealfall frühzeitig interveniert. In der Praxis bedeutet dies jedoch, dass bei einem Versagen des BMS das gesamte Boot in Brand geraten kann, speziell bei Booten mit kohlefaserverstärktem Kunststoffrumpf (GFK oder CFK), der selbst brennbar ist.

Ein Lösungsansatz ist die wasserdichte Kapselung der Batterieeinheit, um sowohl eine externe Brandausbreitung als auch die Emission giftiger Gase einzudämmen. Ergänzend dazu ist die Integration von Notabschaltmechanismen gegen Kurzschlüsse sowie die Entwicklung standardisierter Plug-and-Play-Systeme erforderlich, bei denen

Batterie, Ladetechnik und Steuerungseinheit aufeinander abgestimmt und vorab geprüft sind.

Auch alternative Kraftstoffe wie E-Fuels, Ammoniak oder Methanol werden zunehmend diskutiert. Dennoch fehlen bislang spezifische Normen oder Zertifizierungsverfahren für deren Einsatz im Bereich der Sportboote. ISO-Normen, die sich derzeit in der Entwicklung befinden, könnten hier künftig Abhilfe schaffen. Unter anderem sind folgende Standards in Vorbereitung:

- **ISO/AWI 25128**: *Small craft – Main propulsion system energy consumption assessment*[35]

Diese Norm soll Methoden zur Bewertung des Energieverbrauchs von Hauptantriebssystemen bei kleinen Wasserfahrzeugen festlegen. Das betrifft sowohl klassische Verbrennungsmotoren als auch elektrische oder hybride Systeme. Diese Norm ist besonders relevant für Elektroboote, bei denen derzeit Hersteller oft eigene, nicht vergleichbare Angaben zur Reichweite machen. Eine standardisierte Testmethode würde mehr Transparenz für Verbraucher schaffen und helfen, realistische Betriebsprofile zu entwickeln.

- **ISO/FDIS 23625**: *Small craft – Lithium-ion batteries*[36]

Diese Norm spezifiziert sicherheitsrelevante Anforderungen, Prüfverfahren und Installationsrichtlinien für Lithium-Ionen-Batterien, die als Energiequelle in kleinen Wasserfahrzeugen eingesetzt werden. Sie legt Kriterien für Aufbau, Schutzmaßnahmen, Ladung, Entladung, Temperaturkontrolle und Sicherheitsmechanismen von Lithium-Batterie fest. Sie ist sehr relevant wegen der bekannten Gefahren wie Überhitzung, thermischem Durchgehen (thermal runaway) und Brandrisiken. Das ist wichtig für Hersteller und Betreiber, um sichere Batteriepakete zu entwerfen und korrekt in Bootsysteme zu integrieren.

- **ISO/FDIS 16315**: *Small craft – Electrical systems used for electrical propulsion*[37]

Diese Norm behandelt die Anforderungen an Systeme, die für die elektrische Hauptfortbewegung von Sportbooten verwendet werden. Dazu gehören Verkabelung, elektrische Sicherheit, Steuerungssysteme und Energieverteilung. Sie stellt sicher, dass

elektrische Systeme so ausgelegt sind, dass sie sicher und zuverlässig betrieben werden können – auch unter maritimen Umweltbedingungen. Sie zielt auf den Schutz gegen elektrische Schläge, Kurzschlüsse, Überhitzung und andere Gefahren ab. Sie fördert standardisierte Installationspraktiken und erleichtert die Integration verschiedener Komponenten (z. B. Motor, Steuerung, Batterie, Ladegerät).

- **ISO/NP TS 13297-3**: *Small craft – Alternating and direct current installations of electrical systems – Part 3: Lithium-ion charging*[38]

Diese technische Spezifikation fokussiert sich auf elektrische Installationen in kleinen Wasserfahrzeugen, insbesondere auf Ladeinfrastruktur und Anforderungen an das Laden von Lithium-Ionen-Batterien – sowohl mit Gleichstrom (DC) als auch Wechselstrom (AC). Sie gilt als sein wichtiger Schritt in Richtung Standardisierung von Ladeprozessen auf Booten. Sie hilft, Risiken wie Überladung, fehlerhafte Verkabelung oder inkompatible Ladegeräte zu vermeiden. Sie ist besonders wichtig im Kontext wachsender Nachfrage nach Schnelllade-Optionen (z. B. 400 V DC-Systeme).

Die Einführung dieser Normen ist jedoch frühestens in den kommenden Jahren zu erwarten, wodurch aktuell eine bestehende Lücke zwischen technischer Innovation und regulatorischer Kontrolle bleibt. Diese Diskrepanz erschwert nicht nur die objektive Bewertung von Leistungsparametern – beispielsweise hinsichtlich der Reichweite, da Hersteller diese nach eigenen Kriterien festlegen – sondern birgt auch ein erhöhtes Sicherheitsrisiko durch unzureichend normierte Systemintegration.

Vor dem Hintergrund der oben genannten Entwicklungen wird deutlich, dass eine grundlegende Revision und Erweiterung der bestehenden Zertifizierungsrahmen sowie die Schaffung verbindlicher Mindeststandards für alternative Antriebssysteme im Sportbootsektor erforderlich sind. Dies betrifft insbesondere die Festlegung sicherheitsrelevanter Parameter wie Brandschutz, Zellchemie, Batteriegehäusekonstruktion und Systemvernetzung.

3.1.3. Versicherungsaspekte[10]

Die zunehmende Elektrifizierung im Sportbootsektor stellt nicht nur die Hersteller und Gesetzgeber, sondern auch die Versicherungswirtschaft vor neuartige Herausforderungen. Während konventionelle Antriebssysteme auf jahrzehntelanger Erfahrung und entsprechend etablierten Risikomodellen basieren, fehlt es bei elektrischen und hybriden Antrieben vielfach an ausreichend belastbaren Schadensstatistiken. Dies erschwert eine fundierte Risikoabschätzung und wirkt sich direkt auf Versicherbarkeit und Prämiengestaltung aus.

Frühe Erfahrungen mit elektrischen Antriebssystemen offenbarten eine im Vergleich zu Verbrennungssystemen erhöhte Störanfälligkeit. Insbesondere die Themen Überhitzung, unzureichende Ladesicherheit sowie das latente Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterien führten zu einer überdurchschnittlichen Schadenshäufigkeit. Diese Entwicklungen machten eine intensivere Auseinandersetzung der Versicherungsunternehmen mit der neuen Technologie erforderlich.

In Reaktion darauf haben Versicherer begonnen, spezifische Anforderungen für elektrisch betriebene Wasserfahrzeuge zu formulieren. Diese betreffen insbesondere:

- die Qualität und Zertifizierung der Batteriesysteme,
- die fachgerechte Verkabelung und Systemintegration,
- regelmäßige Wartung und Zustandserfassung der elektrischen Komponenten,
- die Einhaltung sicherheitsrelevanter Normen und Empfehlungen (z. B. ISO/FDIS 23625 für Lithium-Ionen-Batterien).

Darüber hinaus engagieren sich einige Versicherer proaktiv in Forschungs- und Entwicklungsprojekten, um sicherheitsrelevante Erkenntnisse aus Schadenfällen systematisch auszuwerten und die Weiterentwicklung von Standards durch empirische Grundlagen zu unterstützen.

Ein zentrales Risiko im Versicherungszusammenhang stellt die Alterung von Batteriesystemen dar. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren, für die klar definierte Wartungsintervalle und Verschleißindikatoren bestehen, fehlt es bei Lithium-Batterien bislang an standardisierten Prüfprotokollen zur Bewertung von Degradation, Zellchemie oder thermischer Stabilität im Betrieb. Besonders bei privat genutzten Sportbooten bleibt die Zustandsüberwachung oft dem Ermessen der Eigner überlassen. Gewerblich genutzte Fahrzeuge unterliegen hingegen – analog zu Fahrzeugen im Straßenverkehr –

mitunter regelmäßigen technischen Überprüfungen, die an TÜV-ähnliche Standards angelehnt sind.

Die zukünftige Versicherbarkeit elektrisch betriebener Sportboote wird maßgeblich von der Etablierung belastbarer, international anerkannter technischer Normen abhängen. Diese sind essenziell, um Risiken kalkulierbar zu machen, eine fundierte Prämienstruktur zu ermöglichen und den Zugang zu Versicherungsschutz für Eigner und Betreiber zu erleichtern. Im Idealfall kann durch ein koordiniertes Zusammenspiel von Normierung, technischer Innovation und versicherungstechnischer Bewertung nicht nur die Sicherheit, sondern auch die gesellschaftliche Akzeptanz der Elektromobilität im Wassersport nachhaltig gestärkt werden.

3.2. Marinas

3.2.1. Sicherheitsaspekte auf dem Wasser

Mit der zunehmenden Verbreitung elektrisch betriebener Sportboote und alternativer Antriebskonzepte ergeben sich nicht nur neue infrastrukturelle Anforderungen für Marinas, sondern auch bedeutende sicherheitstechnische Herausforderungen. Die bisherige Auslegung konventioneller Landstromanlagen war primär auf die Versorgung von Bordelektronik mit begrenztem Leistungsbedarf ausgelegt. Im Zuge der Elektrifizierung entstehen jedoch neue Belastungsszenarien, vor allem durch den Einsatz leistungsstarker Lithium-Ionen-Batterien und entsprechender Schnellladesysteme mit Spannungen bis über 400 Volt. Diese Systeme erfordern eine umfassende technische Anpassung der Stromversorgungseinrichtungen in Marinas – sowohl hinsichtlich Kapazität als auch im Hinblick auf deren mechanische und elektrische Sicherheit.

Die Integration solcher Ladesysteme in den maritimen Raum stellt besondere Anforderungen, die sich fundamental von denen im Straßenverkehr unterscheiden. Eine wesentliche Herausforderung ergibt sich aus der Aussetzung an gegenüber salzhaltiger Feuchtigkeit, Wellengang, mechanischer Belastung durch Schiffsbewegungen sowie Sturmereignissen. Ladesäulen müssen nicht nur korrosionsbeständig und schlagfest sein, sondern auch eine dauerhafte elektrische Isolation und zuverlässige Erdung gewährleisten – auch unter widrigen Umweltbedingungen. Fehlende Planungserfahrung führt in der Praxis häufig zu fehlerhaften Installationen. Beispielsweise werden Ladesäulen gelegentlich zu niedrig über dem Wasserspiegel montiert, sodass sie bei

hohem Wellengang oder Sturm überflutet werden. Dadurch steigt die Gefahr elektrischer Unfälle wie durch Kurzschlüsse oder Potenzialüberlagerungen erheblich.[10]

Ein weiteres zentrales Problem stellt die mangelnde Differenzierung der Ladeinfrastruktur hinsichtlich verschiedener Bootstypen dar. Während Binnen- oder Daysailer und kleine Sportboote in der Regel mit 12-Volt-Systemen auskommen, benötigen leistungsstärkere Motoryachten und größere Yachten Hochvolt-Lösungen und entsprechend leistungsfähige Ladeeinrichtungen. Die derzeit weit verbreitete Verwendung von Ladesäulen, die ursprünglich für Elektrofahrzeuge an Land konzipiert wurden, zeigt in maritimen Anwendungen erhebliche Schwächen. Dazu zählt besonders die Erdung, die in einem elektrisch leitenden, salzhaltigen Milieu wie Meerwasser völlig andere technische Anforderungen stellt. Der Standardtransfer aus der Automobilindustrie auf die Schifffahrt kann somit nur eingeschränkt erfolgen und erfordert eine grundlegende Anpassung. Es gibt aber viele Erfahrung in der Seeschifffahrt über größeren Landstromanlagen.

Zusätzlich zur elektrischen Infrastruktur besteht ein steigender Bedarf an sicherheitstechnischen Regelungen für alternative Kraftstoffe wie Wasserstoff, E-Fuels oder synthetische Biokraftstoffe. Hier fehlen sowohl einheitliche Lagervorschriften als auch konkrete technische Anforderungen an Betankungseinrichtungen. Die Vermeidung explosiver Gasgemische, die Drucksicherung von Tanks sowie die Absicherung gegen Leckagen sind bislang nicht normativ erfasst. Erste Projektansätze orientieren sich an der Gastechnik der Automobilbranche und schlagen mobile Kartuschen-Systeme vor, die potenziell auch im maritimen Bereich Anwendung finden könnten. Die Umsetzung solcher Lösungen erfordert jedoch klare gesetzliche Rahmenbedingungen, die derzeit noch nicht existieren.

Gleichzeitig zeigen viele bestehende Anlagen strukturelle Defizite hinsichtlich ihrer Langlebigkeit. Die Planung von Stromversorgungssystemen erfolgt häufig ohne ausreichende Berücksichtigung der maritimen Belastungen über den gesamten Lebenszyklus. Schwimmende Pontons mit integrierten Stromanschlüssen sind besonders anfällig für mechanische Schäden durch Wellendruck oder Anprall. Auch bauliche Schutzmaßnahmen wie Wellenbrecher können, wenn sie unzureichend ausgelegt oder falsch platziert sind, zur Beschädigung der Ladeinfrastruktur führen. Eine normgerechte Auslegung für eine Lebensdauer von mindestens 30 Jahren unter maritimen Extrembedingungen ist in der Praxis bislang kaum anzutreffen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die sicherheitstechnische Entwicklung der Lade- und Energieinfrastruktur in Marinas derzeit nicht mit dem technologischen Fortschritt im

Bereich der alternativen Antriebe Schritt hält. Es bedarf dringend einer rechtlich verbindlichen und technisch differenzierten Normierung, die die Besonderheiten des maritimen Umfelds berücksichtigt. Nur so kann langfristig ein sicherer und zuverlässiger Betrieb von elektrisch oder alternativ angetriebenen Sportbooten gewährleistet werden.

3.2.2. Sicherheitsaspekte im Winterlager

Das Winterlager stellt eine zentrale Phase im Lebenszyklus eines Sportbootes dar, in der spezifische Risiken auftreten, die sich maßgeblich von den sicherheitsrelevanten Anforderungen während des regulären Betriebs unterscheiden. Besonders kritisch sind dabei die Bedingungen in Hallen- oder Landlagern, in denen Boote üblicherweise dicht nebeneinander positioniert werden, um die verfügbare Fläche optimal auszunutzen. Diese enge Lagerung führt im Brandfall zu einem erhöhten Übertragungsrisiko auf benachbarte Boote, wodurch selbst ein lokaler Zwischenfall schnell großflächige Schäden verursachen kann. Die Situation wird dadurch erschwert, dass in vielen Lagerhallen die Erreichbarkeit der Boote für Feuerwehr und Rettungskräfte erheblich eingeschränkt ist, z. B. wenn das betroffene Boot nicht unmittelbar an einer Zufahrtsmöglichkeit positioniert ist.

Mit der Zunahme elektrisch betriebener Boote verschärfen sich diese Herausforderungen deutlich. Lithium-Ionen-Batterien, die aufgrund ihrer hohen Energiedichte und Leistungsfähigkeit weit verbreitet sind, stellen auch im unbeaufsichtigten Zustand ein nicht zu vernachlässigendes Brandrisiko dar. Erfahrungsgemäß die Möglichkeit eines thermischen Durchgehens bei Zellversagen – auch ohne externe Stromversorgung – macht es erforderlich, dass Batterien im Winterlager grundsätzlich vom Bordnetz getrennt werden. Fachverbände und Hersteller empfehlen zudem die Einhaltung spezifischer Wartungs- und Lagerungsvorgaben, etwa hinsichtlich Ladezustand, Umgebungstemperatur und regelmäßiger Sichtkontrollen. Trotz dieser Empfehlungen fehlen bislang rechtsverbindliche Vorschriften für das Batteriemanagement in Winterlagerumgebungen, was zu einer erschwerten Risikobewertung und -vermeidung führt.[10]

Hinzu kommt, dass Sportboote – anders als Kraftfahrzeuge – in Deutschland nicht flächendeckend einer regelmäßigen technischen Prüfung unterliegen. Lediglich in speziellen Regionen – etwa auf dem Bodensee – existieren vergleichbare Inspektionssysteme. Dies führt dazu, dass Alterungsprozesse an sicherheitsrelevanten Komponenten wie Batterien, Verkabelung oder Überwachungssystemen häufig unbeachtet bleiben. Für Lithium-Ionen-Akkumulatoren fehlen derzeit Regelungen zur

Zustandsbewertung, zur Lebensdauerprüfung oder zum kontrollierten Recycling. Auch existieren bislang keine gesetzlich verpflichtenden Standards zur Wiederverwendung oder sicheren Entsorgung von Antriebsbatterien im Freizeitsektor; obwohl vergleichbare Regelwerke im Automobilbereich bereits etabliert sind.

Insgesamt zeigt sich, dass das Sicherheitsmanagement im Winterlager von Sportbooten – hinsichtlich der Elektroantriebe – derzeit noch nicht den spezifischen Gefährdungspotenzialen gerecht wird. Die dichte Lagerung, die erschwerte Zugänglichkeit für Rettungskräfte, der unklare Zustand alternder Batteriesysteme sowie der Mangel an verpflichtenden Qualifikationen für beteiligtes Personal führen zu einem erheblichen Risiko, das durch geeignete normative Maßnahmen deutlich reduziert werden könnte. Eine stärkere Standardisierung von Sicherheitskonzepten, Lagerbedingungen und Schulungsprogrammen sollte daher integraler Bestandteil zukünftiger Regulierungsinitiativen im maritimen Bereich sein.

3.2.3. Standards für Marinas

Die regulatorische Situation ist aktuell von einer erheblichen Normenlücke geprägt. Einheitliche technische Standards für Ladeinfrastruktur in Marinas sind bislang nicht etabliert. Zwar existieren Entwürfe auf ISO-Ebene, unter anderem zur sicheren Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien, zur elektrischen Antriebstechnik auf Booten und zu Ladeverfahren für Gleich- und Wechselstromsysteme, jedoch befinden sich diese Normen größtenteils noch in Entwicklung und werden voraussichtlich erst in den kommenden Jahren verbindlich eingeführt. Parallel dazu bestehen auf nationaler Ebene bereits technische Richtlinien des Verbands der Elektrotechnik (VDE), etwa zur Absicherung von Außenanlagen oder zur elektrischen Sicherheit in Feuchträumen. Auch der Normenausschuss für elektrische Ausrüstungen von Wasserfahrzeugen (NCE) arbeitet an maritim-spezifischen Sicherheitsstandards. Die flächendeckende Implementierung dieser Normen in die Planung und Ausstattung von Marinas ist jedoch bislang nicht erfolgt. Während die klassischen Kraftstoffe wie Diesel, E5, E10 und E15 bereits normiert sind, gibt es für andere alternative Kraftstoffe noch keine Normen. Angesichts der neuen Anforderungen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen hinken die Normungsbehörden den sich immer schneller entwickelnden Technologien hinterher, und die Industrie bietet unterschiedliche Lösungen an, was den Prozess der Normung und Zertifizierung immer komplizierter macht.

In stark frequentierten Zeiten ist in Marinas häufig zu beobachten, dass Versorgungskabel ungesichert entlang der Stege verlaufen. Diese Kabel kreuzen sich mehrfach und behindern den Durchgangsbereich, wodurch potenzielle Gefahrenzonen für die Nutzer entstehen. Mit einer zunehmenden Verbreitung elektrisch betriebener Boote würde sich dieses Problem erheblich verschärfen: Die Stege könnten sich in unsichere Bereiche verwandeln, die von einer Vielzahl loser Kabel durchzogen sind. Um diesem Sicherheitsrisiko vorzubeugen, wäre eine Standardisierung der Kabelverlegung auf den Stegen erforderlich. Hierzu könnten Kabelkanäle oder Schutzrohre installiert werden, die eine geordnete Führung der Leitungen gewährleisten. Auf diese Weise ließe sich die sichere und übersichtliche Stromversorgung der Boote realisieren, ohne die Sicherheit von Nutzern, Personal und Booten zu gefährden.

Manche Normen sind schon eingesetzt und gelten im Marinas Bereiche oder vergleichbare Bereiche:

- **IEC 60364-7-709** – *Elektrische Anlagen in Niederspannung – Teil 7-709: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Marinas und ähnliche Bereiche*[39]

Die IEC 60364-7-709 ist die internationale Norm für die Errichtung elektrischer Anlagen in speziellen Bereichen wie Marinas, Häfen für kleine Wasserfahrzeuge und ähnliche Anlagen. In solchen Umgebungen bestehen erhöhte Anforderungen an die Sicherheit elektrischer Installationen, da Feuchtigkeit, salzhaltige Luft und der enge Kontakt zwischen Wasser und elektrischen Geräten das Risiko von Stromunfällen deutlich erhöhen. Die Norm legt besonderen Wert auf den Schutz von Menschen vor elektrischem Schlag sowie auf die Betriebssicherheit und Langlebigkeit der Anlagen. Ein zentrales Element der Norm sind die Vorschriften für Steckdosen und elektrische Anschlüsse an den Liegeplätzen. Jede Steckdose muss einzeln abgesichert und mit einem Fehlerstromschutzschalter (RCD) mit einem Auslösestrom von maximal 30 mA ausgestattet sein. Dies gewährleistet einen erhöhten Personenschutz. Außerdem müssen die Steckdosen wetterfest (mindestens IP44) und gegen mechanische Einwirkungen geschützt sein. Die Installationen müssen so geplant werden, dass sie auch bei Überschwemmungen oder starker Feuchtigkeit sicher funktionieren. Besondere Anforderungen bestehen zudem an die Erdung und den Potenzialausgleich, um gefährliche Ströme und galvanische Korrosion zu vermeiden. Die IEC 60364-7-709 berücksichtigt zudem zukünftige Anforderungen, die durch die zunehmende Elektrifizierung im Wassersportbereich entstehen. Dazu gehören etwa die sichere Integration von Ladeinfrastruktur für Elektroboote und die Gewährleistung einer ausreichenden Netzkapazität für höhere Ladeleistungen. Die Norm ist damit eine

wichtige Grundlage für die Planung moderner und zukunftssicherer Marinas und spielt eine entscheidende Rolle, wenn es um die Kombination aus Sicherheit, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort geht.

- **DIN VDE 0100-709** – *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 7-709: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Häfen für kleine Wasserfahrzeuge und ähnliche Bereiche*[40]

Die DIN VDE 0100-709:2020-02 regelt die elektrischen Installationen in Marinas, Sportboothäfen und ähnlichen Bereichen, in denen Boote mit Strom versorgt werden. Aufgrund der besonderen Umgebung mit hoher Feuchtigkeit, Salzwasser und möglicher mechanischer Belastung stellt die Norm hohe Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit. Dazu gehören unter anderem die Pflicht zur Verwendung von Fehlerstromschutzschaltern (RCD ≤ 30 mA), der Einsatz von witterungsbeständigen Steckdosen (mindestens IP44) sowie ein klar geregelter Potenzialausgleich zur Vermeidung von elektrischen Gefährdungen und Korrosion. Jede Steckdose muss einzeln abgesichert und eindeutig gekennzeichnet sein, um Fehlbedienungen zu vermeiden. Neben diesen grundlegenden Anforderungen berücksichtigt die aktuelle Version der Norm auch den zunehmenden Bedarf an Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Boote. Die Vorschriften sind so gestaltet, dass auch Ladeeinrichtungen für größere Ströme und Schnellladevorgänge sicher integriert werden können. Zudem wird ein besonderes Augenmerk auf regelmäßige Wartung und Inspektion gelegt, um die dauerhafte Betriebssicherheit zu gewährleisten. Damit bildet die Norm die zentrale Grundlage für die sichere, zukunftsfähige und normgerechte Elektrifizierung von Marinas.

- **IEC 61439-7** – *Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Teil 7: Anforderungen für Schaltgerätekombinationen für spezielle Anwendungen wie Campingplätze, Marktplätze, Marinas und Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge*[41]

Die IEC 61439-7 ist eine spezielle Norm für die Schaltgerätekombinationen (Verteiler), die in Bereichen wie Marinas, Campingplätzen, Marktplätzen und Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge verwendet werden. In Marinas regelt sie in erster Linie die Anforderungen an die Anschlusssäulen und Verteilerschränke, die Strom an die Boote liefern. Diese Geräte müssen robust und sicher sein, da sie häufig im Freien stehen und dort hoher Feuchtigkeit, salzhaltiger Luft und mechanischen Einwirkungen ausgesetzt sind. Die Norm legt daher Anforderungen an die Schutzart (z. B. mindestens IP44 oder höher), an die mechanische Festigkeit und an die Sicherheit der elektrischen

Komponenten fest. Ziel ist es, sowohl den Nutzer als auch die Anlage selbst vor Gefahren wie elektrischen Schlägen, Kurzschlüssen oder Bränden zu schützen. Neben den baulichen Anforderungen regelt die IEC 61439-7 auch die Prüfung und Kennzeichnung der Schaltgerätekombinationen. Diese müssen vor der Inbetriebnahme umfangreichen Typ- und Stückprüfungen unterzogen werden, um sicherzustellen, dass sie den extremen Bedingungen im Einsatz standhalten. Die Norm ist damit vor allem für die Hersteller von Anschlusssäulen relevant, die ihre Produkte so gestalten müssen, dass sie langlebig, sicher und normgerecht sind. In Kombination mit der IEC 60364-7-709 (Installationsvorschriften) bildet die IEC 61439-7 die technische Grundlage für sichere und zuverlässige Stromversorgungslösungen in modernen Marinas.

- **ISO 13297: 2020** – *Kleine Wasserfahrzeuge – Elektrische Systeme – Wechsel- und Gleichstrominstallationen*[42]

Die Norm ISO 13297 legt die Anforderungen für die Planung und Installation von elektrischen Systemen auf kleinen Booten fest. Dazu gehören sowohl Systeme mit Gleichstrom (DC) als auch mit Wechselstrom (AC). Ziel ist es, ein hohes Maß an Sicherheit für die Benutzer und die Boote zu gewährleisten. Die Norm definiert die erforderlichen Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag, Brandgefahr und Funktionsstörungen. Dazu gehören Regeln zur Dimensionierung von Leitungen, Auswahl von Schutzgeräten, Erdung und Absicherung. Besonders wichtig ist auch der Schutz gegen die speziellen Umgebungsbedingungen auf See wie Feuchtigkeit, Korrosion und Vibrationen.

- **DIN EN 15869** – *Kleine Wasserfahrzeuge – Elektrische Landanschlüsse.*[43]

Die DIN EN 15869 ist eine europäische Norm, die sich mit der sicheren Stromversorgung von Sportbooten über Landanschlüsse befasst. Sie legt Anforderungen an elektrische Verbindungssysteme zwischen Boot und Land fest – insbesondere für den Anschluss an das 230-Volt-Wechselstromnetz in Marinas. Ziel ist es, elektrische Unfälle, Überlastungen oder Kurzschlüsse zu vermeiden und eine normgerechte Verbindung mit Schutzerdung, Fehlerstromschutzschaltern (FI) und genormten Steckverbindungen (z. B. CEE-Stecker) sicherzustellen. Die Norm ist besonders wichtig für Betreiber von Yachthäfen und Bootsbesitzer, da sie eine einheitliche, sichere Infrastruktur für die Landstromversorgung schafft – ein essenzieller Bestandteil der wachsenden Elektromobilität auf dem Wasser.

Es gibt auch einen Mangel an Standards für die Winterlagerung von Elektrobooten. Wenn bei der Überwinterung in einer Halle mit Elektrobooten ein Feuer ausbricht, sind die Lithiumbatterien nur sehr schwer zu löschen, was zu einem Brand der gesamten Halle und damit aller Boote führen kann. Das Problem ist, dass neue Elektroboote oft sehr teuer sind und im Freien schneller kaputt gehen können. Es muss also ein Kompromiss gefunden werden, um die Bedürfnisse der Nutzer zu befriedigen, ohne die Sicherheit im Winterlager zu gefährden.

3.2.4. Versicherungsaspekte

Mit der zunehmenden Elektrifizierung im Bereich der Sport- und Freizeitschifffahrt sind Marinas mit neuen sicherheits- und versicherungstechnischen Herausforderungen konfrontiert. Im Besonderen der Betrieb von Ladeinfrastrukturen sowie die Lagerung elektrisch betriebener Boote mit großvolumigen Batteriesystemen führen zu einer erheblichen Erhöhung des Risikoprofils. Infolgedessen fordern Versicherungsunternehmen zunehmend spezifisch definierte Sicherheitskonzepte und technische Nachweise, um eine Versicherungsdeckung überhaupt anbieten zu können.

Ein zentrales sicherheitstechnisches Risiko stellt die Brandgefahr dar, die primär von Lithium-Ionen-Batterien ausgeht. Der sogenannte „thermal runaway“-Effekt kann durch interne Kurzschlüsse oder externe Überlastungen ausgelöst werden und ist in seiner Dynamik schwer zu kontrollieren. Die dabei entstehenden Brände sind nicht nur schwer zu löschen, sondern setzen auch toxische Gase frei, was das Gefahrenpotenzial erheblich erhöht. Trotz dieser bekannten Risiken existieren bislang keine verbindlichen Brandschutzstandards für Marinas, auch nicht für den Umgang mit Hochvoltsystemen oder Schnellladesäulen. Erste technische Maßnahmen wie die gekapselte Bauweise von Batterieeinheiten oder der Einsatz von speziellem Brandschutzschaum, befinden sich in der Erprobung oder werden vereinzelt bereits umgesetzt.

Auch im Winterlager verschärft sich die sicherheitstechnische Lage deutlich. Die dichte Lagerung mehrerer Boote erhöht im Ernstfall die Wahrscheinlichkeit der Brandausbreitung. Angesichts der Tatsache, dass Lithium-Ionen-Batterien selbst im entladenen Zustand ein Risiko darstellen können, wird empfohlen, Batterien während der Einlagerung vollständig vom Bordnetz zu trennen. Fachlich fundierte Schulungsangebote für das Marina-Personal existieren, sind jedoch freiwillig und werden bislang nur punktuell umgesetzt.[10]

Versicherungsunternehmen wie z. B. Pantaenius haben auf diese Entwicklungen reagiert und formulieren zunehmend technische Mindestanforderungen an Boote und Infrastrukturen. Diese umfassen unter anderem die Qualität der Batteriesysteme, die Einhaltung einschlägiger Normen (z. B. ISO/FDIS 23625 für Lithium-Ionen-Batterien), die korrekte Systemintegration sowie die regelmäßige Wartung sicherheitsrelevanter Komponenten. Gleichzeitig engagieren sich einzelne Versicherer in Forschungs- und Entwicklungsprojekten, um empirisch fundierte Risikomodelle zu entwickeln.

Regionale Pilotprojekte, etwa in Mecklenburg-Vorpommern oder Brandenburg, zeigen, dass praxistaugliche Lösungen – beispielsweise durch die Anpassung der Landstromversorgung, den Ausbau seewasserresistenter Schnellladeinfrastruktur oder gezielte Personalschulungen – möglich sind. Dennoch fehlt es bislang an flächendeckend geltenden Standards. Die regulatorischen Rahmenbedingungen werden durch eine Vielzahl paralleler Normierungsansätze (z. B. ISO, VDE, NCE) geprägt, deren Implementierung in der Praxis oft fragmentarisch erfolgt.

Langfristig ist eine enge Kooperation zwischen Marinas, der Versicherungswirtschaft und den Regulierungsbehörden erforderlich, um den Dreiklang aus Sicherheit, Innovationsförderung und Investitionsschutz im wachsenden Markt für emissionsarme Antriebssysteme sicherzustellen.

3.2.5. Vertragsrecht für die Abrechnung und Stromaufnahme

Die vertragliche Regelung zur Stromabrechnung und Stromaufnahme bei Elektrobooten befindet sich derzeit in einem rechtlich unklaren und technisch unzureichend standardisierten Zustand. Marinas stellen in der Regel lediglich einfache 220-Volt-Steckdosen zur Verfügung, die ursprünglich für kleinere Verbraucher wie Bordelektronik vorgesehen waren. Diese sind weder für den Ladebedarf leistungsstarker Lithium-Ionen-Batterien konzipiert, noch sind sie in der Regel mit eichrechtskonformen Zählern ausgestattet. Dadurch fehlt eine transparente und verbrauchsabhängige Abrechnung. Stattdessen wird der Stromverbrauch meist pauschal über die Liegeplatzgebühr abgedeckt, was weder fair noch nachvollziehbar ist – wenn man bedenkt, dass Boote mit unterschiedlich hohem Energiebedarf dieselben Kosten tragen.

Die vorliegenden Lösungen zeichnen sich durch eine hohe Diversität aus. Bezüglich der Zahlungsmodalitäten bestehen drei Optionen: Erstens kann ein Abonnement

abgeschlossen werden, zweitens kann eine Kartenzahlung an externen, automatisierten Terminals vorgenommen werden, oder drittens kann die Zahlung direkt an den Hafenmeister entrichtet werden. Die Entscheidung, welche Art von Automaten in einem Yachthafen aufgestellt werden soll, obliegt der jeweiligen Betreibergesellschaft. Um dies zu beurteilen, ist es unerlässlich, sich die verschiedenen Varianten und ihre jeweiligen Stärken und Schwächen vor Augen zu führen.

Zahlungsmethode	Vorteile	Nachteile
Abonnement	• Einfach für Abonnenten • kein Aufwand pro Ladevorgang • kalkulierbare Kosten • geringe Verwaltung und Personal für Marinas	• Unflexibel für Gelegenheitsnutzer • Kostenintensive Installation
Kartenzahlung an der Ladesäule	• Flexibel für alle Nutzer • Automatisierte Abrechnung • bereits vorhandene Technologie	• Hohe Kosten für Infrastruktur (Terminal und Wartung) • Bei Störung kein Laden möglich
Zahlung an der Hafenmeisterei	• Bessere Beratung • Einfachere Überwachung des Zustands von Booten beim Laden • Keine zusätzliche Ladesäulentechnik nötig	• Abhängig von Öffnungszeiten • Personalaufwand • Unflexibel für Wassersportler

Abbildung 32: Vergleich von Zahlungsmethoden[10]

3.2.6. Bedarf nach Schulung

Ein weiterer sicherheitsrelevanter Aspekt betrifft die Qualifikation des Personals, das mit der Einlagerung und Überwachung der Boote betraut ist. Zwar existieren vereinzelt Schulungsangebote, etwa durch den Bundesverband Wassersportwirtschaft (BVWW)

oder den Deutschen Boots- und Schiffbauer-Verband (DBSV), doch sind diese freiwillig und nicht flächendeckend etabliert. Konkret der Umgang mit Hochvolttechnik über 60 Volt – wie sie in modernen Elektroantrieben häufig vorkommt – setzt spezielle Kenntnisse voraus, die bislang nicht flächendeckend nachgewiesen werden müssen. Auch die Feuerwehrkräfte, die im Ernstfall mit Elektrobootbränden konfrontiert werden, sind häufig nicht ausreichend auf die spezifischen Gefahren vorbereitet. Etwa auf die Tatsache, dass das Löschen von Lithium-Batterien mit Wasser zu gefährlichen chemischen Reaktionen führen kann. In diesem Zusammenhang wäre eine systematische Integration von brandschutztechnischen Schulungen in das Aus- und Fortbildungsprogramm für Marina- und Servicepersonal dringend nötig.[10]

4. Politische und wirtschaftliche Aspekte der Thematik

4.1. Wirtschaftliche Anforderung an Marinas

4.1.1. Gibt es eine Kundschaft für nachhaltige Boote?

Der Markt für Sportboote in Deutschland ist in den vergangenen Jahren konstant gewachsen und zeichnet sich durch eine bemerkenswerte Vielfalt an Bootseignern aus. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland rund 448.000 Bootseigner verzeichnet, davon 44.000 neue Eigner. Das Durchschnittsalter dieser Nutzer beträgt 62 Jahre, was auf eine eher erfahrene und komfortorientierte Kundengruppe schließen lässt. Zudem werden jährlich etwa 42.000 Boote erworben, wovon rund 76 % aus dem Gebrauchtbootmarkt stammen, während etwa 10.000 Neubauten verzeichnet werden. Neubootkäufer entscheiden sich vorwiegend für offene Sportboote sowie gebrauchte Segelyachten. Diese statistischen Daten verdeutlichen die hohe Bedeutung des Bestandsmarktes und die relativ geringe Anzahl an vollständig neuen Booten, was für die Einführung neuer Technologien eine besondere Herausforderung darstellt.[44]

Die Analyse der Nutzungs- und Wechseltrends unterstreicht, dass die Eigner zumeist eine hohe Bindung an ihre Bootsarten aufweisen. Motoryacht- und Sportbootbesitzer wechseln selten die Bootskategorie. Auch Eigner von Segeljollen und Segelyachten bleiben ihren Kategorien häufig treu, wobei altersbedingte Gründe gelegentlich einen Wechsel zu einfacher handhabbaren Motoryachten oder Sportbooten nahelegen. Diese Entwicklung zeigt, dass neben ökologischen Aspekten hier Nutzungsgewohnheiten und Komfortüberlegungen zentrale Entscheidungskriterien darstellen.[44]

Parallel zu dieser beständigen Nachfrage nach konventionellen Antriebsformen lässt sich jedoch eine zunehmende Sensibilität der Kunden für nachhaltige und umweltfreundliche Mobilitätslösungen feststellen. Viele Eigner empfinden das Naturerlebnis als essenziellen Bestandteil des Wassersports und schätzen daher emissionsfreie und geräuscharme Antriebskonzepte. Der Wunsch nach einem intensiveren Naturerlebnis ohne störende Geräusche, Gerüche und Vibrationen klassischer Verbrennungsmotoren spiegelt sich in einer wachsenden Nachfrage nach Elektrobooten wider. Diese bieten die Möglichkeit, lautlos und nahezu wartungsfrei über Binnengewässer zu gleiten und fördern damit das Bedürfnis nach Ruhe und Entschleunigung.[44]

Gleichzeitig wird die Verbreitung dieser Technologie durch mehrere Faktoren eingeschränkt. Die hohen Anschaffungskosten von Elektrobooten, die im Vergleich zu konventionellen Modellen teils erheblich teurer sind, stellen ein wesentliches Hemmnis dar. Vor allem für Nutzer, deren Boote saisonal oder nur gelegentlich genutzt werden, ist diese Investition oftmals schwer zu rechtfertigen. Hinzu kommt die begrenzte Reichweite vieler Elektroboote sowie die noch unzureichend ausgebaute Ladeinfrastruktur. Diese Unsicherheiten führen dazu, dass potenzielle Käufer befürchten, bei ungünstigen Bedingungen nicht sicher zum Heimathafen zurückzukehren.[10]

Vor diesem Hintergrund erweist sich die Nachfrage nach nachhaltigen Booten als teilweise vorhanden, jedoch stark segmentiert. Während für sportlich ambitionierte oder reichweitenorientierte Anwendungen alternative Kraftstoffe wie HVO oder E-Fuels eine zukünftig relevante Rolle spielen könnten, sprechen Elektroantriebe derzeit vor allem eine Zielgruppe an, die Wert auf Entspannung, Komfort und Umweltfreundlichkeit legt. Diese Klientel, häufig wohlhabender und weniger auf hohe Fahrleistungen angewiesen, nutzt ihre Boote bevorzugt in ruhigen, geschützten Gewässern.

Dennoch wird der Markt für größere Elektroboote von Unsicherheiten geprägt; aufgrund der noch nicht flächendeckend verfügbaren Infrastruktur, einen Mangel an Standards und der hohen Investitionskosten. Für die breite Etablierung alternativer Antriebstechnologien wird es daher entscheidend sein, sowohl die technische Reife als auch die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme weiter voranzutreiben.

Auf Bundeswasserstraßen, die als Naturschutzgebiete ausgewiesen sind, ist das Befahren gemäß den geltenden Schutzverordnungen grundsätzlich untersagt. Eine Ausnahmegenehmigung für elektrisch betriebene Wasserfahrzeuge kann unter bestimmten Voraussetzungen durch die zuständige Naturschutzbehörde erteilt werden, insbesondere bei Vorliegen eines wissenschaftlichen, naturschutzfachlichen oder nachhaltig-touristischen Interesses. Angesichts der wachsenden Nachfrage nach emissionsfreien Antriebssystemen im Freizeitschifffahrtssektor stellt sich vermehrt die Frage nach einer differenzierten Regulierung, die die leisen, schadstofffreien Eigenschaften von Elektrobooten berücksichtigt und deren kontrollierten Zugang zu sensiblen Gewässerbereichen unter strengen Auflagen ermöglicht.[27]

4.1.2. Sind die Lösungen schon einsetzbar?

Die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien für Sportboote hat in den letzten Jahren spürbare Fortschritte gemacht. Lösungen wie Elektroantriebe und Biokraftstoffe, insbesondere HVO, sind heute grundsätzlich verfügbar und finden in der Praxis bereits Anwendung. Beispiele hierfür sind unter anderem die Demostrecke auf dem Rhein-Marne-Kanal, die von der französischen Wasserstraßenverwaltung (VNF) betrieben wird, sowie Marinas, die HVO als Kraftstoffoption anbieten. Auch in Deutschland ist die Ladeinfrastruktur auf einem gewissen Niveau bereits vorhanden. In vielen Marinas stehen herkömmliche 220-Volt-Steckdosen an nahezu allen Liegeplätzen zur Verfügung, was für kleinere Boote wie Jollen und für Freizeitnutzer ausreichend sein könnte. Die Ladezeiten spielen in diesen Einsatzszenarien eine untergeordnete Rolle, da die Boote oft über Nacht oder zwischen den Fahrten geladen werden können.[10]

Gleichwohl sind diese technologischen Lösungen noch nicht in einem Maße ausgereift, dass ihr flächendeckender Einsatz im Sportbootbereich ohne Einschränkungen möglich wäre. Neben den Antriebstechnologien selbst stellen vor allem wirtschaftliche und infrastrukturelle Faktoren zentrale Herausforderungen dar. Während für manche Anwendungen – wie die Nutzung auf Kanälen und Binnengewässern – elektrische Antriebe als hinreichend gelten, sind bei längeren Fahrten oder im maritimen Bereich die begrenzte Reichweite und die Verfügbarkeit geeigneter Ladepunkte erhebliche Hemmnisse. Dennoch gelingt es einigen Wassersportlern, sich entsprechend zu organisieren und vollständig elektrische Bootstouren zu unternehmen. Ein Beispiel hierfür ist ein Skipper, der den Nord-Ostsee-Kanal mit einem Elektroboot überquerte und dabei tägliche Etappen von etwa 90 km zurücklegte. Das Boot war mit einem 10 kW starken Motor ausgestattet und erreichte eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 8 km/h. In der Nacht wurde das Boot über das reguläre 16-A-Netzstromanschluss geladen.[10]

Zudem zeigt sich, dass die Ladeinfrastruktur, die für eine größere Marktdurchdringung erforderlich wäre, mit erheblichen Investitionen verbunden ist. Der Aufbau von zwanzig Autoladestationen in einem Hafen würde nach Angaben der Branche etwa 400.000 Euro kosten und stellt damit für viele Marinas eine kaum tragbare Belastung dar. Auch einzelne Ladesäulen sind mit hohen Kosten verbunden, die sich je nach Ausführung und Abrechnungssystem zwischen 700 Euro und bis zu 2.500 Euro bewegen.[10] Speziell Schnellladestationen erfordern zudem einen leistungsstarken Stromanschluss sowie

gegebenenfalls ein eigenes Umspannwerk, was die Installations- und Betriebskosten zusätzlich erhöht. Aus diesen Gründen beschränken sich die aktuellen Ladeoptionen in den meisten Marinas bislang auf die Nutzung vorhandener Niederspannungsnetze.

Ergänzend zu diesen infrastrukturellen Barrieren ist auch die Kundenakzeptanz bislang ambivalent. Während ein wachsender Anteil der Eigner nachhaltige Lösungen grundsätzlich befürwortet, zeigen sich viele noch zurückhaltend. Die höheren Anschaffungskosten für Elektroboote, die im Durchschnitt rund 30 bis 35 Prozent über denen konventioneller Dieselboote liegen, sowie die eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten führen dazu, dass viele potenzielle Käufer einer Umstellung nicht angehen. Besonders im Bereich der Sportboote, die häufig nur saisonal oder gelegentlich genutzt werden, sind die wirtschaftlichen Argumente für einen Wechsel zu emissionsärmeren Antrieben bislang nur begrenzt überzeugend.

Gleichwohl gibt es erste Ansätze, diese Probleme durch innovative Geschäftsmodelle zu überwinden. Anbieter wie Aqua Superpower bieten Marinas bereits vollständig finanzierte und betreute Ladeinfrastrukturen an, die keine Investitionen seitens der Betreiber erfordern. Solche Modelle könnten mittelfristig helfen, die Hürde der hohen Anfangsinvestitionen zu senken und die Verfügbarkeit von Ladepunkten zu erhöhen.

Um die Betreib mit E-Boote, die mehr Strom brauchen praktikabel zu machen brauchen aber Segler ausreichend Orten mit Ladeanlagen. Daher reicht es nicht aus, dass eine Marine allein in Infrastruktur für E-Boote investiert. Vielmehr geht es darum, in dem Segel/Fahrtgebiete Netze von Strominfrastruktur zu entwickeln. Idealerweise können mehrere Marinas und des Charterers kooperieren, um solche Netze zu schaffen. Dazu gehört eine standardisierte Bezahlung per Kreditkarte oder App. Die Anlagen sind schon in einige Marinas vorhanden.[45]

Schiffsantriebe, die Wasserstoff, Ammoniak oder Methanol aus erneuerbarem Strom verwenden, werden derzeit entwickelt. Weil sie alle eine andere Bunkerlieferkette brauchen und weil die Kraftstoffe sehr teuer wird, ist der Empfehlung, dass die BVWW-Mitglieder in diesem Bereich nicht einsteigen.[45]

4.2. Politische Aspekte der Thematik

4.2.1. Wie kann man diese neuen Antriebe einsetzen

Die Einführung emissionsarmer Antriebstechnologien bei Sportbooten stellt auch die Marinas vor erhebliche Herausforderungen. Diese betreffen nicht nur die technische Umsetzung neuer Energieversorgungskonzepte, sondern erfordern zugleich wirtschaftlich tragfähige Investitionsstrategien. Angesichts der bereits wachsenden Verbreitung von Elektrobooten sowie der zukünftigen Relevanz von Biokraftstoffen und E-Fuels sind Marinas zunehmend gefordert, eine flexible und zukunftsweisende Infrastruktur aufzubauen.

Angesichts der Vielzahl an Herausforderungen und des Umfangs der erforderlichen Veränderungen ist es von zentraler Bedeutung sich bewusst zu machen, dass ein sofortiger, umfassender Wandel nicht realistisch ist. Vielmehr sollte ein schrittweises Vorgehen angestrebt werden, um die anfänglichen Investitionskosten möglichst gering zu halten. Marinas könnten daher zunächst einzelne Maßnahmen ergreifen, beispielsweise die Installation einer Ladestation oder die Bereitstellung von Biokraftstoffen wie HVO (wie bei ULTRAMARIN am Bodensee)[10] – je nach individuellem Bedarf. Sollte dies auf positive Resonanz bei den Nutzern stoßen, könnte ein sich selbst verstärkender Effekt eintreten, der die Finanzierung weiterer Infrastrukturen begünstigt.

In diesem Zusammenhang erscheint es sinnvoll, Erfahrungen aus dem Bereich der LKW-Mobilität zu berücksichtigen. Ähnlich wie Boote stellen auch Lastkraftwagen aufgrund ihrer spezifischen Einsatzanforderungen eine größere Herausforderung bei der Dekarbonisierung dar als PKW. Dennoch sind dort bereits Initiativen für den Einsatz von Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen zu beobachten. Selbst Unternehmen wie Amazon haben Elektro-LKW bestellt, um ihre Flotte für mittelgroße Distanzen zwischen Logistikzentren auszustatten. Auch hier wird die jeweils am besten geeignete Lösung in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen gewählt.

Schließlich erweist sich die Frage der Flexibilität als ein entscheidendes Kriterium für zukünftige Investitionen. Marinas sollten angesichts der ungewissen Entwicklung der Antriebstechnologien möglichst technologieoffen planen. Dies bedeutet, dass neben dem Aufbau von Ladeinfrastrukturen auch die Möglichkeit zur Integration von Biokraftstoff- und E-Fuel-Systemen geprüft werden sollte. Dabei kann es sinnvoll sein, zunächst mit kleineren, skalierbaren Lösungen zu beginnen und die Infrastruktur

schrittweise an die Marktentwicklung und die Kundenbedürfnisse anzupassen. Kooperationen mit Bootsherstellern, Charterfirmen und Sportbootvereinen können darüber hinaus helfen, die Nachfrage zu stimulieren und die Investitionsrisiken besser zu verteilen.

Es ist daher unerlässlich, die Bedürfnisse jeder Region sowie der jeweiligen Navigationsumgebungen genau zu analysieren, um Investitionen ohne echten Mehrwert zu vermeiden. So ist beispielsweise nicht in allen Fällen eine Schnellladeinfrastruktur mit 400 V erforderlich; ebenso wenig wie die gleichzeitige Bereitstellung von Biokraftstoffen und E-Fuels zwingend notwendig ist.

4.2.2. Förderprogramme für die Sportbootfahrtbranche

Die Transformation der Sportbootbranche hin zu emissionsärmeren und perspektivisch emissionsfreien Antriebstechnologien erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch finanzielle Anstrengungen. Vor diesem Hintergrund sind Förderprogramme und politische Unterstützung von großer Bedeutung. Während die private Nachfrage nach umweltfreundlicher Bootsmobilität wächst, fehlen vielfach die wirtschaftlichen Anreize und Mittel, um die erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen umzusetzen. Insbesondere die Marinas sehen sich mit hohen Investitionskosten konfrontiert und sind in ihrer Rolle als Infrastrukturanbieter auf Unterstützung angewiesen.

Der Bedarf an öffentlichen Förderprogrammen ist angesichts der aktuellen Marktlage offensichtlich. Die Marina-Betreiber selbst verfügen möglicherweise nicht über ausreichende finanzielle Mittel oder möchten nicht investieren, da die Risiken zu hoch sind, deswegen brauchen sie finanzielle Unterstützung oder agile Lösungen wie Ladesäule-Leasing oder Autos- und Bootssäule. Auch die Bootshersteller zeigen sich in der gegenwärtigen Phase der Marktentwicklung zurückhaltend. Daher sind staatliche Impulse notwendig, um den Aufbau von Verbrauchsstellen sowie die Förderung der Produktions- und Entwicklungskapazitäten zu gewährleisten. Neben der Finanzierung von Forschung und Entwicklung (FuE) ist es auch Aufgabe der Politik, einen stabilen und verlässlichen Ordnungsrahmen zu schaffen, der Planungssicherheit für Unternehmen und Investoren bietet.

Bereits heute lassen sich erste Ansätze erkennen, die auf eine zunehmende politische Steuerung und Förderung der Thematik hindeuten. Beispielhaft ist das von der Stadt

Amsterdam beschlossene Verbot von Verbrennungsmotoren für Tourismusboote ab dem Jahr 2025.[46] Dieses Verbot zeigt, wie kommunale Vorgaben unmittelbare Markteinflüsse erzeugen und auf andere Städte ausstrahlen können. Auch Berlin hat mit seinem neuen Wassertourismuskonzept die Weichen in Richtung einer sauberen und elektrifizierten Nutzung der Gewässer gestellt. Solche lokalen Regelungen erzeugen Nachfrage und schaffen Märkte für Ladeinfrastruktur und elektrische Antriebssysteme.[47]

Auf Landesebene engagieren sich Schleswig-Holstein und weitere norddeutsche Bundesländer für die Entwicklung einer nachhaltigen Infrastruktur. Im Ostseebereich wird beispielsweise daran gearbeitet, eine einheitliche Strategie sowie eine Übersichtskarte für Ladesäulen zu etablieren. Projekte wie der angedachte "Elektropfad" entlang des Nord-Ostsee-Kanals, der perspektivisch auch Skandinavien und die Niederlande einbinden könnte, zeigen das Potenzial gemeinschaftlicher Initiativen zwischen Häfen, Versicherern und staatlichen Institutionen. Baden-Württemberg erstellt eine Strategie für eine klimaneutrale Mobilität und in Berlin werden Ladesäule für Transportschiffe Westhafen Berlin und nachhaltige Tourismuskonzepte entwickelt [10]

Auch auf europäischer Ebene existieren bedeutende Förderprogramme. Im Rahmen von Horizon Europe stehen erhebliche Mittel für die Erforschung und Entwicklung klimaneutraler Antriebstechnologien zur Verfügung (100% direkt Kosten + 20% Nebenkosten). Besonders Pilotprojekte und Infrastrukturmaßnahmen können hier mit bis zu 80 % der Kosten gefördert werden (EU-Interreg). Weitere Programme wie Interreg bieten ebenfalls Unterstützung für länderübergreifende Kooperationen im maritimen Bereich. Während die Binnen- und Sportschifffahrt bislang nicht in den Geltungsbereich von THG-Regulierungen fällt, wird auf EU-Ebene zunehmend anerkannt, dass auch dieser Sektor zur Erreichung der Klimaziele beitragen muss.[45]

Auf Bundesebene bestehen weitere Fördermöglichkeiten. Das Bundesministerium Verkehr (BMV) hat mehrere Richtlinien erlassen, die unter anderem die nachhaltige Modernisierung von Binnenschiffen und den Einsatz emissionsarmer Antriebssysteme fördern.[48] Auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) setzt mit seiner Maritimen Forschungsstrategie 2025 gezielte Impulse. Hierbei wird in erster Linie der Forschungsschwerpunkt „Klimaneutrales Schiff“ unterstützt, der neben der Entwicklung neuer Antriebstechnologien auch Investitionen in FuE-relevante Infrastruktur umfasst.[49]

Schließlich zeigen auch Erfahrungen aus Frankreich, dass die gezielte Förderung von Freizeitgewässern und entsprechenden Infrastrukturen erfolgreich sein kann. Die dort bereitgestellten fünf Millionen Euro für einen Freizeitsee verdeutlichen die Relevanz

solcher Programme. Analog hierzu wäre auch für die deutsche Sportbootsbranche eine stärkere politische Unterstützung wünschenswert.

Beispiele [45]

Kanäle und Binnenwasser

Bereits heute verfügen verschiedene Strecken deutscher Binnenwasserstraßen über funktionstüchtige Ladestationen, die eine rein elektrische Befahrung mit Sportbooten ermöglichen. Diese bestehenden Ladepunkte, vor allem entlang touristisch genutzter Kanäle, stellen eine wertvolle Ausgangsbasis für den schrittweisen Aufbau eines zusammenhängenden Netzwerks dar. Ziel ist es, durch gezielte Investitionen die vorhandene Infrastruktur zu verdichten und Versorgungslücken im Streckennetz zu schließen.

Ein erster Schritt zum Netzausbau ist die Identifikation potenzieller Regionen, in denen sich eine signifikante Nachfrage nach E-Sportbooten entwickeln könnte – vorausgesetzt, die notwendige Ladeinfrastruktur ist vorhanden. Besonders geeignet sind Fahrtgebiete, in denen einzelne Ladepunkte bereits existieren und somit nur noch vereinzelte „Netzlücken“ geschlossen werden müssen. Dies ermöglicht kosteneffiziente Ausbaustrategien entlang bereits genutzter Routen.

Beispiel mit einer Forschungsfahrzeug: Die MS Mülheim der WSW.de (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) ist für E-Betrieb auf der Wesel-Datteln-Kanal und den Ruhr Gebiet ausgelegt. Sie hat E-Antrieb: 2* 80kW mit 980kWh Batterie. Das ist ausreichend für dieses Gebiet. Testfahrten auf den Rhein und Mosel haben gezeigt, dass die Batterien gerade ausreichend für Fahrten auf freifliesende Gewässer (Rhein, Mosel) sind. Eine Solofahrt Flussaufwärts und Verband mit Kahn Talfahrt Koblenz-Brodenbach-Koblenz (50,6 km) hat 6 Stunde. 50 Min gedauert mit eine Energieverbrauch von 410 kWh). Für eine regelmäßige Betrieb braucht es mehr 63/125A Landanschlüsse.

Bodensee

Im Rahmen der regionalen Klimaschutzstrategie soll die Nutzung fossiler Kraftstoffe im Wassersport am Bodensee schrittweise eingestellt werden. Künftig sollen ausschließlich biogene Alternativen wie HVO 100 oder Nautik E10 zugelassen werden.

Das Pilotprojekt „Klimafreundlicher Bodensee “, das vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg gefördert wird, sieht den Aufbau entsprechender Tankstelleninfrastruktur im Marina Ultramarin vor. Diese Kraftstoffe können als Drop-in-Lösung ohne technische Modifikationen an bestehenden Motoren verwendet werden, sind jedoch zunächst kostenintensiver als herkömmlicher Marine Diesel.

Trotz wachsender Diskussion um emissionsfreie Antriebe wird bis 2035 nur ein moderater Anstieg der Stromnachfrage für Elektroantriebe in Marinas am Bodensee erwartet. Der Hauptbedarf konzentriert sich weiterhin auf die Versorgung der bordeigenen Systeme über 220 V/16 A-Anschlüsse. Die Nachfrage nach Schnellladeinfrastruktur für elektrische Antriebe bleibt voraussichtlich gering. Auch bei zunehmender Bordelektronik wird zunächst kein flächendeckender Ausbau der Landstromkapazitäten erforderlich sein.

Laut der Landesstrategie für klimaneutrale Mobilität Baden-Württembergs sind Pilotprojekte für Hochleistungsladestationen denkbar – insbesondere für größere E-Antriebe im Sportbootbereich. Eine von ULTRAMARIN angeregte Maßnahme ist die Entwicklung von Kombinationsladestationen für PKW/LKW und Boote, vielleicht durch Integration in das entstehende Ladeinfrastrukturnetz z.B. von ARAG. Voraussetzung wäre die Entwicklung eines Konverters zur Bootsanbindung, um eine sichere Stromübertragung zu gewährleisten. Dieses Konzept könnte modellhaft zur sektorübergreifenden Nutzung beitragen. Bei erfolgreicher Umsetzung der Pilotprojekte ist eine koordiniert grenzüberschreitende Einschränkung fossiler Kraftstoffe im Einvernehmen mit den Schweizer und österreichischen Behörden denkbar. Alternativ könnte eine regulatorische Steuerung über THG-Emissionen erfolgen. Im Zusammenhang mit den HVO- und Nautic-E10-Tankstellen ist zudem eine Preisdifferenzierung gegenüber fossilen Kraftstoffen vorgesehen. Die CO_2-Einsparung soll pro Tankvorgang berechnet und transparent auf der Quittung ausgewiesen werden, um Nutzer für klimafreundliches Verhalten zu sensibilisieren. in prominentes Beispiel für die technologische Umstellung ist die MS Insel Mainau der Bodensee-Schiffsbetriebe. Das Passagierschiff verkehrt zwischen Unteruhldingen und der Insel Mainau und ist mit zwei 75 kW Elektromotoren sowie einer Batterie mit ca. 960 kWh Kapazität ausgestattet. Dieses Projekt demonstriert die technische Machbarkeit leistungsstarker, lokal emissionsfreier Antriebssysteme im touristischen Linienverkehr auf Binnengewässern.

Der Erfolg solcher Vorhaben hängt maßgeblich von der Kooperation zwischen Marinas, Charterunternehmen sowie kommunalen und Landesbehörden ab. Beispielhafte Initiativen, wie die dieses Elektromobilitätsprojekt in der Marina ULTRAMARIN am

Bodensee oder die Ladeinfrastruktur im Berliner Westen, zeigen, dass seitens der Landesregierungen ein hohes Interesse an emissionsfreier Mobilität auf dem Wasser besteht. Ein koordiniertes Vorgehen kann nicht nur wirtschaftliche Synergien schaffen, sondern auch zur Erhöhung der Standortattraktivität für den Wassertourismus beitragen.

Nord/Ostsee/Kiel Kanal

Auch in der Ostseeregion ist der koordinierte Ausbau von Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Sportboote von strategischer Bedeutung, wobei insbesondere Kooperationen zwischen Marinas, Charterunternehmen und kommunalen Akteuren angestrebt werden sollten. Eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit mit Partnern in den Niederlanden, Dänemark, Schweden, Finnland und Polen erscheint hierbei sinnvoll, insbesondere im Rahmen bestehender europäischer Förderprogramme wie INTERREG Baltic Sea Region oder der EU-Strategie für den Ostseeraum (EUSBSR), die unter anderem vom Tourismusbereich durch Netzwerkaktivitäten unterstützt wird. Trotz der aktuell geringen Nachfrage nach E-Sportbooten und des Fehlens verbindlicher THG-Regulierungen für die Freizeitschifffahrt in Nord- und Ostsee stellt der vergleichsweise hohe Anteil großer, reichweitenintensiver Sportboote eine Herausforderung für batterieelektrische Antriebe dar. Dennoch bietet sich die Möglichkeit, durch den punktuellen Ausbau leistungsfähiger Schnellladestationen – ergänzend zu bestehenden 220 V/16 A-Landanschlüssen – eine grundlegende Infrastruktur zu schaffen. Diese könnte über kooperative Finanzierungsmodelle mit Landesmitteln oder regionalen Innovationsförderungen (z. B. über das Maritime Cluster Norddeutschland) wirtschaftlich tragfähig gestaltet werden und so als Pilotmodell für nachhaltige maritime Mobilität in Küstenregionen dienen.

5. Visionen von Marinas der Zukunft

5.1. Annahme für Anwendungsfälle

Um die Visionen zu erstellen, muss man sich überlegen, wie die verschiedenen Marinas bis 2035-2040 aussehen werden. Durch einen Workshop und Interviews sind vier Fallbeispiele entwickelt worden:

- Eine Marina auf einem Kanal mit 20 Liegeplätzen
- Eine Marina auf einem Kanal mit 150 Liegeplätzen
- Eine Marina am Bodensee mit 1400 Liegeplätzen
- Eine Marina an der Ostsee mit 1400 Liegeplätzen.

In jedem Yachthafen wurden die Boote in fünf Kategorien eingeteilt, von denen jede ihre eigenen Besonderheiten hat.

Boote	Segelboote	Jolle	Offene Mooorboote	Motorjachten - Gleiter - Tragflächenboote	Verdränger
Besonderheiten	Motor nur für in und aus dem Hafen	Motor nur für in und aus dem Hafen Viele kleine Außenbordmotore Einfach zu elektrifizieren Tagesnutzung	Keine große Reichweite nötig Tagesnutzung Viele sind kleine und leichte	sind große und schwer brauchen große Reichweite können schnell fahren Tragflächenboote werden elektrifiziert	sind große und schwer fahren langsam Komfort ist wichtig

Um Visionen zu erstellen, mussten einige Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen werden im Folgenden in jeder Fallstudie erläutert.

Diese Annahmen beziehen sich auf verschiedene Punkte, nämlich:

- Die Erneuerungsrate der Schiffe in jeder Region bis 2035.
- Die durchschnittliche Batteriekapazität jeder Schiffskategorie in jeder Navigationsbereich.
- Der Prozentsatz der neuen Boote, die mit Strom versorgt werden. (Umbau zu aufwendig – nur schnelle Umrüstung bei Außenboards)

Die als elektrisch betriebenen Boote werden neue Boote sein. Die Prozentzahlen der elektrischen Boote sind also ein Teil der erneuerten Boote.
z.B. 30% von neuen E-Boote mit einem Erneuerungsrat von 33% bedeutet 10% von e-Booten in dem Marina.

Wenn diese Annahmen berücksichtigt sind, führt eine Berechnung zur Anzahl der Elektroboote in jedem Yachthafen und damit zur Gesamtkapazität, die in dem Marina integriert ist.

Als letzte Hypothese ist davon auszugehen, dass 20% der Boote zur gleichen Zeit geladen werden oder dass alle Boote zur gleichen Zeit laden, aber in 5 Stunden geladen werden.

Die Marinas der Zukunft werden auch Ladelösungen brauchen. Für die Visionen sind drei Lösungen verwendet.

Ladeinfrastruktur	Wo?	Leistung (kW)	Preis (€)
230V CEE	an den Liegeplätzen	3,5	1.000 €
11 kW oder 22 kW - Typ 2	LP und stationäre	22	8.000 €
Schnellladung - 80 kW	stationäre	100	75.000 €

Es ist zu beachten, dass alle Plätze bereits mit 230V CEE- Anschlüssen ausgestattet sind.

Um diesen Yachthafen energieautark zu machen, gibt es eine Berechnung der Fläche an Photovoltaikmodulen, um ausreichend Strom zu liefern.

Solarpaneele Daten	Flächenleistung (kW/m^2)	Flächenpreis (€/m^2)
	0,2	200 €

So wird den Bedarf an elektrischer Leistung für jeden Anwendungsfall berechnet und daraus die Anzahl der verschiedenen Ladelösungen jedes Typs ableiten. Zum Vergleich: Wie groß müsste die Fläche an Photovoltaikmodulen sein, damit die Neuheiten im Yachthafen energieautark sind.

5.2. Binnenbereich

Annahmen

Kriterien	Werte	Begründungen
Erneuerungsrat	33 %	Der Lebensdauer eines Boots ist circa. 30 Jahre, also in 10 Jahren wird ein Drittel davon erneut.
Durchschnittliche Kapazität	SY: 20 kWh OM: 35 kWh MY, Gleiter: 40 kWh Verdränger: 40 kWh	Sie sind kleinere Boote, die nur bis 6 Knoten fahren können. Tragflächenboote gibt es keine.
Der Prozentsatz der neuen E- Boote	SY: 60% OM: 30% MY, Gleiter: 0% Verdränger: 20%	Die Boote sind einfach hier zu elektrifizieren. SY: mit klein E-Außenbordmotor OM: Tagesnutzung und bequem → E-Antrieb MY, Gleiter: zu groß lieber alternative Kraftstoffe Verdränger: groß and fahren langsam → E-Antrieb möglich

SY: Segelyacht
OM: Offene Motorboot
MY: Motoryacht

Marina	Kanäle/Binnenwasser	20 Liegeplätze	Kapazität	Kapazität für die Berechnung (kWh)	Leistung
Boote	Segler	2	10-50 kWh	20	10-20 kW
	Offene Motorboote	2	20-80 kWh	35	10-30 kW
	Motorjachten Gleiter	3	20-80 kWh	40	10-50 kW
	Verdränger	13	40-75 kWh	40	10-50 kW
Erneuerungsrate von Booten	33%				

Marina	Kanäle/Binnenwasser	Teil von Elektrifizierung der Booten	Anzahl von E Boote (20 LG)	Kapazität von Booten kWh (20 LG)
Boote	Segler	60%	1	20
	Offene Motorboote	30%	1	35
	Motorjachten Gleiter	0%	0	0
	Verdränger	20%	5	200

Total	255
gebrauchte Leistung (kW)	51
	0,1 MW

Bis 2035	Total von E-Boote	Grebrauchtete Leistung (kW)	CEE (3,5 kW)	Typ 2 (22 kW)	Schnell (100 kW)	Total (kW)	**Total Preis**
Binnenwasser (20 LG)	7	51	17	3	0	126	**24.000 €**

Bis 2035	Fläche Solarpaneele eq. (m^2)	Preis Solaranlage(€)	**Preis Totalaufwand (€)**	**Investition pro Jahr (auf 10 Jahren)**
Binnenwasser (20 LG)	628	125.500 €	**149.500 €**	**14.950 €**

Abbildung 33: Use-Case Marina-Kanal 20 Liegeplätze

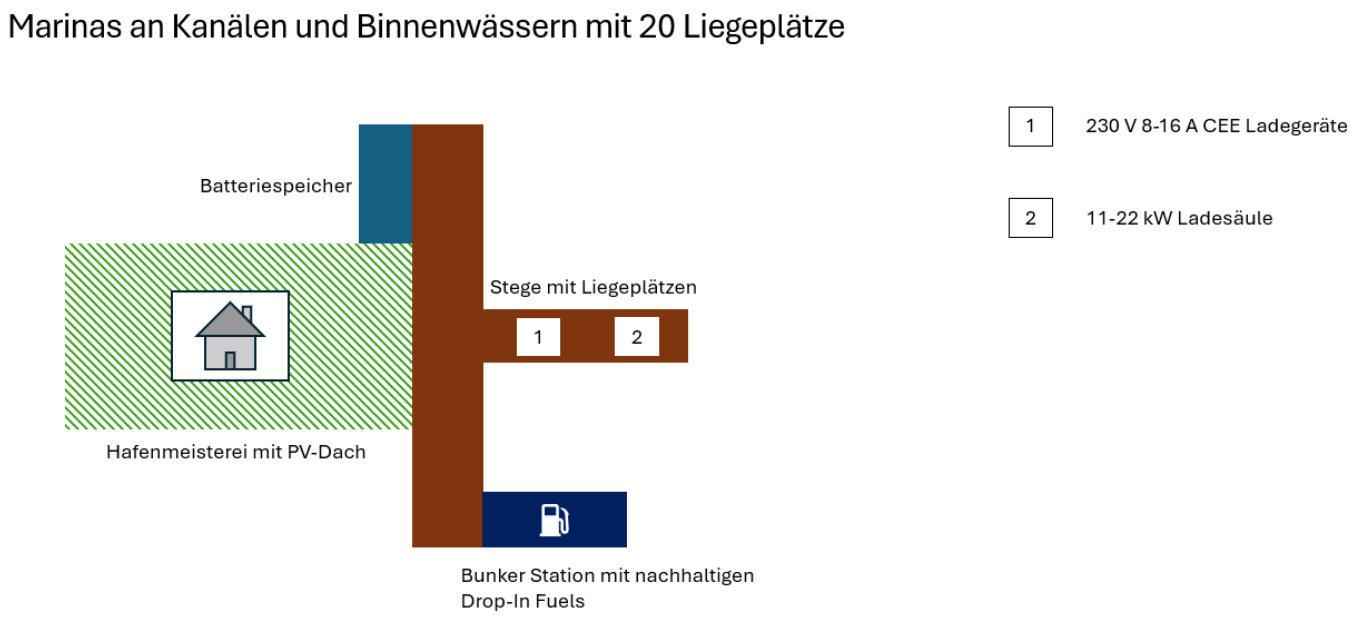


Abbildung 34: Vision einer Marina am Kanal mit 20 Liegeplätze

Angesichts der Größe der Boote und der Größe der Marina ist eine Schnellladestation nicht erforderlich. Denn die Boote auf den Kanälen sind überwiegend Verdränger, die tagsüber mit geringer Geschwindigkeit fahren.

Marina	**Kanäle/Binnenwasser**	**150 Liegeplätze**	Kapazität	Kapazität für die Berechnung (kWh)	Leistung
Boote	Segler	15	10-50 kWh	20	10-20 kW
	Offene Motorboote	15	20-80 kWh	35	10-30 kW
	Motorjachten Gleiter	20	20-80 kWh	40	10-50 kW
	Verdränger	100	40-75 kWh	40	10-50 kW
Erneuerungsrate von Booten	33%				

Marina	**Kanäle/Binnenwasser**	Prozent von Elektrifizierung der Boot	Anzahl von E Boote (150 LG)	Kapazität von Booten kWh (150 LG)
Boote	Segler	60%	9	180
	Offene Motorboote	30%	5	158
	Motorjachten Gleiter	0%	0	0
	Verdränger	20%	20	800

Total	1138
gebrauchte Leistung kW	228
	0,3 MW

Bis 2035	Total von E-Boote	Grebrauchtete Leistung (kW)	CEE (3,5 kW)	Typ 2 (22 kW)	Schnell (100 kW)	Total (kW)	**Total Preis**
Binnenwasser (150 LG)	34	228	135	14	1	881	**187.000 €**

Bis 2035	Fläche Solarpaneele eq. (m^2)	Preis Solaranlage(€)	**Preis Totalaufwand (€)**	**Investition pro Jahr (auf 10 Jahren)**
Binnenwasser (150 LG)	4403	880.500 €	**1.067.500 €**	**106.750 €**

Abbildung 35: Use-Case Marina-Kanal 150 Liegeplätze

Marinas an Kanälen und Binnenwässern mit 150 Liegeplätze

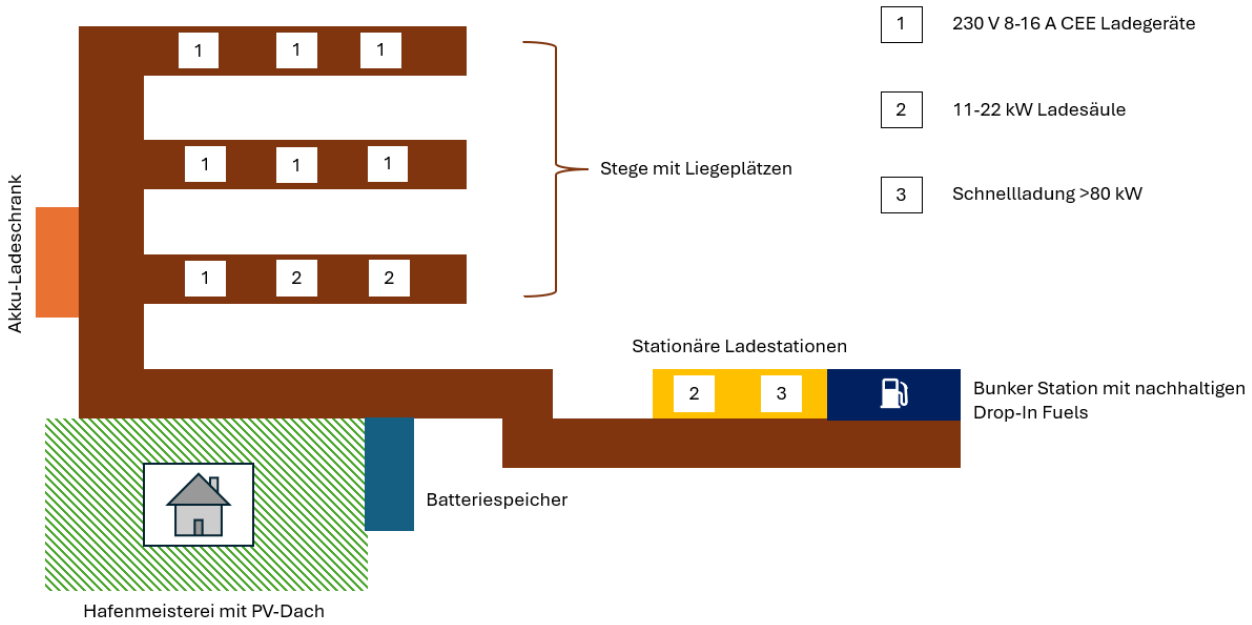


Abbildung 36: Vision einer Marina am Kanal mit 150 Liegeplätze

Bei einer größeren Kanal-Marina ist es sinnvoll, die Lademöglichkeiten mit einer Schnellladestation an einem speziellen Kai zu variieren, da die Anzahl der Boote viel größer ist und einige von ihnen schnell wegfahren oder nur für eine kurze Pause aufladen müssen. Diese Schnellladestation wird durch eine Typ-2- Ladestation ergänzt, um die Nachfrage an vollen Wochenenden zu befriedigen. In der Marina ist das Prinzip das gleiche wie in der kleineren Marina, nur dass sie an die größere Anzahl von Liegeplätzen angepasst ist.

5.3. Bodenseebereich

Annahmen

Kriterien	Werte	Begründungen
Erneuerungsrat	33 %	Der Lebensdauer eines Boots ist circa. 30 Jahre, also in 10 Jahren wird ein Drittel davon erneut.
Durchschnittliche Kapazität	SY: 40 kWh Jolle: 5 kWh OM: 40 kWh MY-Gl-TFB: 90 kWh Verdränger: 80 kWh	
Der Prozentsatz der neuen E- Boote	SY: 50% Jolle: 60% OM: 20% MY-Gl-TFB: 10% Verdränger: 10%	Am Bodensee gibt es schon HVO → weniger Nachfrage nach E-Antriebe SY und Jolle: nur in und aus dem Hafen OM: Reichweite nicht genügend für die Mehrheit MY-Gl-TFB: TFB mit E-Antrieb MY und Gl mit alternativen Kraftstoffen Verdränger: Reichweite nicht genügend für die Mehrheit

SY: Segelyacht
OM: Offene Motorboot
MY: Motoryacht
Gl: Gleiter
TFB: Tragflächenboot

Marina	Bodensee	1318 Liegeplätze	Kapazität	Kapazität für die Berechnung (kWh)	Leistung
Boote	Segler	879	10-50 kWh	40	10-50 kW
	Jolle	12	1-5 kWh	5	1-10 kW
	Offene Motorboote	100	20-60 kWh	40	20-40 kW
	Gleiter - Tragflächenboote	157	70-200 kWh	90	50-250 kW
	Verdränger	170	30-120 kWh	80	40-150 kW
Erneuerungsrate von Booten	33%				

Marina	Bodensee	Teil von Elektrifizierung der	Anzahl von E Boote	Kapazität von Booten (kWh)
Boote	Segler	50%	145	5801
	Jolle	60%	2	12
	Offene Motorboote	20%	7	264
	Gleiter - Tragflächenboote	10%	5	466
	Verdränger	10%	6	449

Total (kWh)	6992
Gebrauchtete Leistung (kW)	1398
	1,4 MW

Bis 2035	Total von E-Boote	Grebrauchtete Leistung (kW)	CEE (3,5 kW)	Typ 2 (22 kW)	Schnell (100 kW)	Total (kW)	**Total Preis**
Bodensee (1400 LG)	165	1398	1350	47	3	6059	**601.000 €**

Bis 2035	Fläche Solarpaneele eq. (m^2)	Preis Solaranlage(€)	**Preis Totalaufwand (€)**	**Investition pro Jahr (auf 10 Jahren)**
Bodensee (1400 LG)	30295	6.059.000 €	**6.660.000 €**	**666.000 €**

Abbildung 37: Use-Case Marina-Bodensee 1400 Liegeplätze

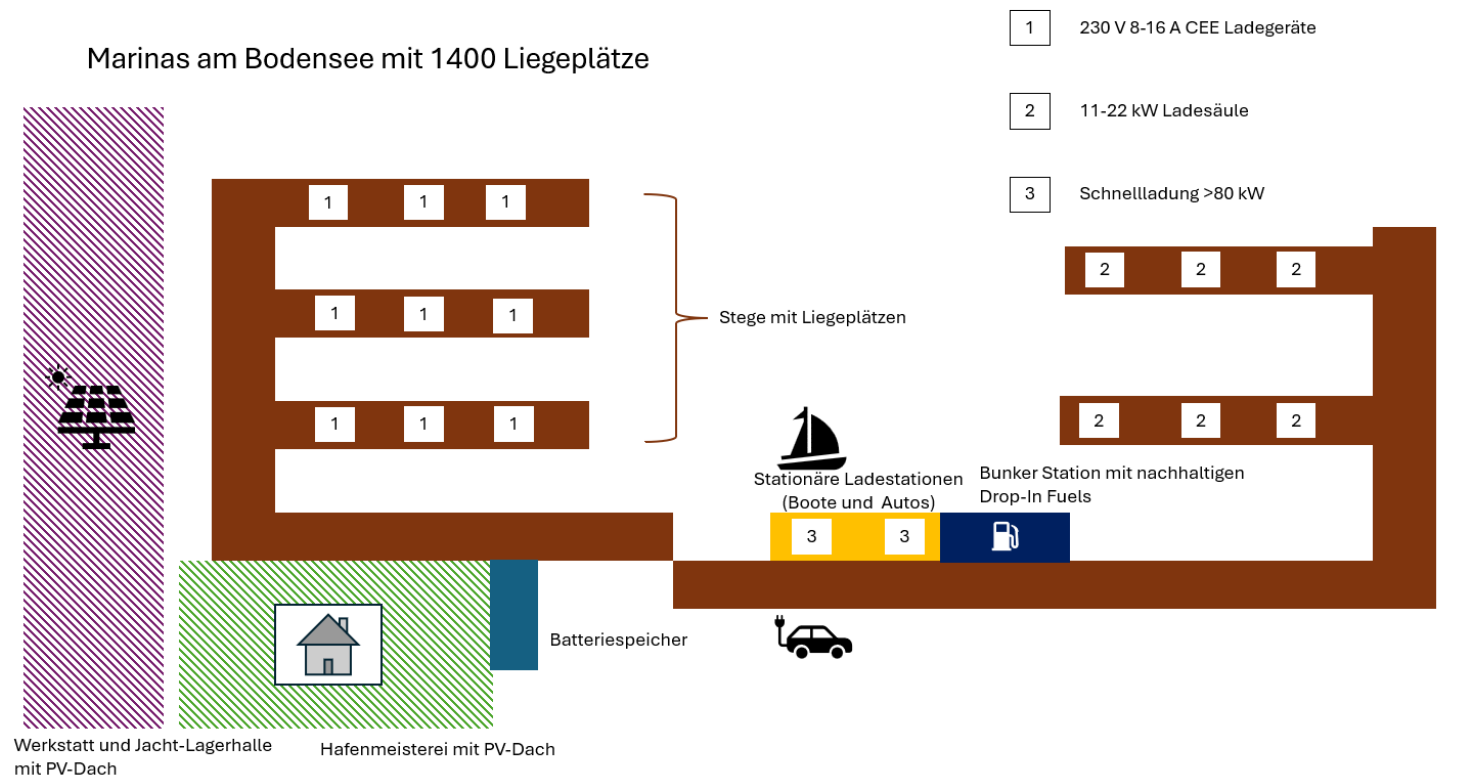


Abbildung 38: Vision einer Marina am Bodensee mit 1400 Liegeplätze

Für die Marina am Bodensee wurde ein Bereich für Elektroboote mit Typ-2-Ladestationen auf den Plätzen (rechts) eingerichtet. An einem Lade-Dock befinden sich zwei Schnellladestationen, die Boote und Autos gleichzeitig aufladen können.

5.4. Nord/Ostseebereich und Kiel Kanal

Annahmen

Kriterien	Werte	Begründungen
Erneuerungsrat	50 %	Der Lebensdauer eines Boots ist circa. 20 Jahre, also in 10 Jahren wird die Hälfte davon erneut. Kleiner aufgrund viele Charterboote.
Durchschnittliche Kapazität	SY: 40 kWh Jolle: 5 kWh OM: 40 kWh MY-Gl-TFB: 90 kWh Verdränger: 80 kWh	
Der Prozentsatz der neuen E- Boote	SY: 50% Jolle: 60% OM: 30% MY-Gl-TFB: 0% Verdränger: 10%	SY und Jolle: nur in und aus dem Hafen und bequem. OM: E-Antrieb leise und geeignet, um zu cruisen. MY-Gl-TFB: Reichweite nicht genügend mit E-Antrieben → lieber mit alternativen Kraftstoffen. Verdränger: Reichweite nicht genügend für die Mehrheit

SY: Segelyacht
OM: Offene Motorboot
MY: Motoryacht
Gl: Gleiter
TFB: Tragflächenboot

Marina	Ostsee	1400 Liegeplätze	Kapazität	Kapazität für die Berechnung (kWh)	Leistung
Boote	Segler	532	10-50 kWh	40	10-50 kW
	Jolle	70	1-5 kwh	5	1-10 kW
	Offene Motorboote	140	20-120 kWh	40	20-40 kW
	Gleiter - Tragflächenboote	280	70-200 kWh	90	50-200 kW
	Verdränger	378	30-120 kWh	80	40-150 kW
Erneuerungsrate von Booten	50%				

Marina	Ostsee	Teil von Elektrifizierung der Booten	Anzahl von E Boote	Kapazität von Booten (kWh)
Boote	Segler	50%	133	5320
	Jolle	65%	23	114
	Offene Motorboote	30%	21	840
	Gleiter - Tragflächenboote	0%	0	0
	Verdränger	10%	19	1512

Total	7786
gebrauchte Leistung kW	1557
	1,6 MW

Bis 2035	Total von E-Boote	Grebrauchtete Leistung (kW)	CEE (3,5 kW)	Typ 2 (22 kW)	Schnell (100 kW)	Total (kW)	Total Preis
Ostsee (1400)	196	1557	1330	70	5	6695	**935.000 €**

Bis 2035	Fläche Solarpaneele eq. (m^2)	Preis Solaranlage(€)	Preis Totalaufwand (€)	Investition pro Jahr (auf 10 Jahren)
Ostsee (1400)	33475	6.695.000 €	**7.630.000 €**	**763.000 €**

Abbildung 39: Use-Case Marina-Nord/Ostsee 1400 Liegeplätze

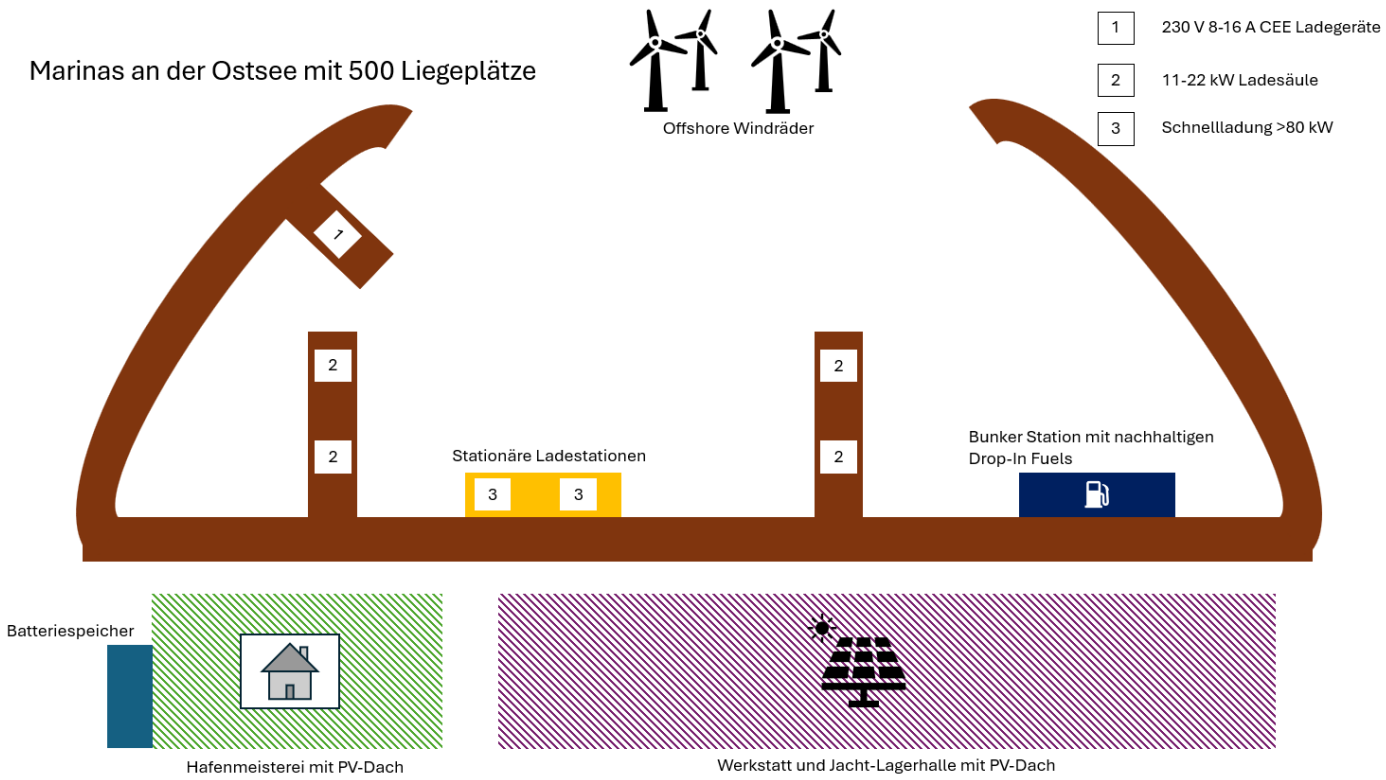


Abbildung 40: Vision einer Marina am Nord/Ostsee mit 1400 Liegeplätze

Für den Yachthafen am Meer gibt es die größte Gesamtkapazität, da HVO dort derzeit noch nicht verfügbar ist und daher der Elektroantrieb vor allem für Segelboote und Jollen eine größere Rolle spielen wird. Neben Photovoltaikanlagen kann auch eine Windkraftanlage Strom liefern. Im Yachthafen gibt es auch einen Bereich für Elektroboote und Typ-2-Anschlüsse sowie eine Anlegestelle für stationäre Schnellladungen.

In der Zukunft werden in Marinas erneuerbare Kraftstoffe nichtfossilen Ursprungs angeboten.

6. Fazit

Im Bereich Verkehr konzentrieren sich die meisten Untersuchungen, Betrachtungen und Bemühungen auf Straßenfahrzeuge, Frachtschiffe und Flugzeuge. Im Bereich der Sportbootfahrt, die in geringerem Umfang zur Gesamtemission beitragen, gibt es derzeit aber auch noch keine allgemein anerkannten Lösungen oder verbindliche Pläne zu einer nachhaltigen und zielführenden Emissionsminderung bis hin zur „Zero Emission“. In dieser Studie sind daher die verschiedenen Aspekte untersucht, die den Sportbootfahrt in eine kohlenstoffärmere Zukunft führen können.

Die Sportbootbereich soll frühzeitig und auf guter Datenbasis mit Analysen und nachfolgend mit der Erarbeitung von Handlungsoptionen weiterentwickeln. Sowohl Technische als auch wirtschaftliche Aspekten müssen betrachtet werden. Finanzmittel, Arbeitsplätze und Technologien sind mit dem Thema Yachten, Sportboote und Marinas verbunden. Es soll vermieden, dass die Akteure dieser Branche von politischen Zwängen überrumpelt werden.

Da die Lösungen bereits weitgehend entwickelt und einsatzbereit sind, müssen die verschiedenen Infrastrukturen aufgebaut werden, damit die emissionsarmen Schiffe in den Yachthäfen ankommen. Mit der Einführung neuer Standards, der Kontrolle des Risikos, dass sich Lithium-Ionen-Batterien entzünden, und verbesserten Sicherheitssystemen werden diese neuen Technologien die Käufer beruhigen und Finanzierungsprogramme könnten den Yachthäfen helfen, ihre Vorgehensweise zu ändern. Je nach Segelgebiet und den Besonderheiten der einzelnen Gebiete müssen die geeigneten Lösungen gefunden werden, um die Rentabilität zu gewährleisten. Die Zusammenarbeit zwischen den Marinas in einem bestimmten Gebiet wird von entscheidender Bedeutung sein, um den Wassersportlern mehrere Strecken zu bieten und die Umstellung auf umweltfreundliche Antriebssysteme zu fördern.

Abbildung 24 fasst die jeweils relevantesten Antriebstechnologien in Abhängigkeit vom Bootstyp und der Navigationsregion – stets unter dem Gesichtspunkt eines emissionsarmen Betriebs zusammen.

	Bootsart und Antriebsart											
	Motorboot				Segelboot				Jolle / Klein Boot			
Fahrbereich	**Diesel**	**Elektro**	**HVO**	**E-Fuels**	**Diesel**	**Elektro**	**HVO**	**E-Fuels**	**Diesel**	**Elektro**	**HVO**	**E-Fuels**
Binnenwasser												
Bodensee												
Ostsee												

Legende:
sehr gut angepasst | gut angepasst | teilweise angepasst | nicht so gut angepasst | nicht angepasst

Abbildung 41: Die Einbindung von Technologien nach Booten und Gebieten

Die Nachfrage nach nachhaltigen Booten erweist sich als teilweise vorhanden, jedoch stark segmentiert. Während für sportlich ambitionierte oder reichweitenorientierte Anwendungen alternative Kraftstoffe wie HVO oder E-Fuels eine zukünftig relevante Rolle spielen könnten, sprechen Elektroantriebe derzeit vor allem eine Zielgruppe an, die Wert auf Entspannung, Komfort und Umweltfreundlichkeit legt. Diese Klientel, häufig wohlhabender und weniger auf hohe Fahrleistungen angewiesen, nutzt ihre Boote bevorzugt in ruhigen, geschützten Gewässern. Dennoch wird der Markt für größere Elektroboote von Unsicherheiten geprägt; aufgrund der noch nicht flächendeckend verfügbaren Infrastruktur, einen Mangel an Standards und der hohen Investitionskosten. Für die breite Etablierung alternativer Antriebstechnologien wird es daher entscheidend sein, sowohl die technische Reife als auch die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme weiter voranzutreiben.

Die Ladeinfrastruktur, die für eine größere Marktdurchdringung erforderlich wäre, ist mit erheblichen Investitionen verbunden. Speziell Schnellladestationen erfordern zudem einen leistungsstarken Stromanschluss sowie gegebenenfalls ein eigenes Umspannwerk, was die Installations- und Betriebskosten zusätzlich erhöht. Aus diesen Gründen beschränken sich die aktuellen Ladeoptionen in den meisten Marinas bislang auf die Nutzung vorhandener Niederspannungsnetze. Im Zuge der Elektrifizierung entstehen jedoch neue Belastungsszenarien, vor allem durch den Einsatz leistungsstarker Lithium-Ionen-Batterien und entsprechender Schnellladesysteme mit Spannungen bis zu über 400 Volt. Diese Systeme erfordern eine umfassende technische

Anpassung der Stromversorgungseinrichtungen in Marinas – sowohl hinsichtlich Kapazität als auch im Hinblick auf deren mechanische und elektrische Sicherheit.

Zusätzlich zur elektrischen Infrastruktur besteht ein steigender Bedarf an sicherheitstechnischen Regelungen für alternative Kraftstoffe wie Wasserstoff, E-Fuels oder synthetische Biokraftstoffe. Hier fehlen sowohl einheitliche Lagervorschriften als auch konkrete technische Anforderungen an Betankungseinrichtungen.

Um die Betreib mit E-Boote, die mehr Strom brauchen, praktikabel zu machen brauchen Segler ausreichend Orten mit Ladeanlagen. Daher reicht es nicht aus, dass eine Marine allein in Infrastruktur für E-Boote investiert. Vielmehr geht es darum, in dem Segel/Fahrtgebiete Netze von Strominfrastruktur zu entwickeln. Idealerweise können mehrere Marinas und des Charterers kooperieren, um solche Netze zu schaffen. Dazu gehört eine standardisierte Bezahlung per Kreditkarte oder App. Die Anlagen sind schon in einige Marinas vorhanden.

Ergänzend zu diesen infrastrukturellen Barrieren ist auch die Kundenakzeptanz bislang ambivalent. Während ein wachsender Anteil der Eigner nachhaltige Lösungen grundsätzlich befürwortet, zeigen sich viele noch zurückhaltend. Die höheren Anschaffungskosten für Elektroboote, die im Durchschnitt rund 30 bis 35 Prozent über denen konventioneller Dieselboote liegen, sowie die eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten führen dazu, dass viele potenzielle Käufer vor einer Umstellung zurückschrecken. Besonders im Bereich der Sportboote, die häufig nur saisonal oder gelegentlich genutzt werden, sind die wirtschaftlichen Argumente für einen Wechsel zu emissionsärmeren Antrieben bislang nur begrenzt überzeugend.

Schließlich erweist sich die Frage der Flexibilität als ein entscheidendes Kriterium für zukünftige Investitionen. Marinas sollten angesichts der ungewissen Entwicklung der Antriebstechnologien möglichst technologieoffen planen. Dies bedeutet, dass neben dem Aufbau von Ladeinfrastrukturen auch die Möglichkeit zur Integration von Biokraftstoff- und E-Fuel-Systemen geprüft werden sollte. Dabei kann es sinnvoll sein, zunächst mit kleineren, skalierbaren Lösungen zu beginnen und die Infrastruktur schrittweise an die Marktentwicklung und die Kundenbedürfnisse anzupassen. Kooperationen mit Bootsherstellern, Charterfirmen und Sportbootvereinen können darüber hinaus helfen, die Nachfrage zu stimulieren und die Investitionsrisiken besser zu verteilen.

7. Literaturverzeichnis

[1] Umweltbundesamt, *Detaillierte Treibhausgas-Emissionsbilanz 2022: Emissionen sanken um 40 Prozent gegenüber 1990 – EU-Klimaschutzvorgaben werden eingehalten*.
[2] Burgess yacht **2023**.
[3] Boote Magazine, "Grüne Transformation – gelingt die Zeitenwende auf dem Wasser?", can be found under https://www.boote-magazin.de/boote/elektroboote/technik-gruene-transformation-gelingt-die-zeitenwende-auf-dem-wasser/, **2024**.
[4] Emobility Engineering **2024**.
[5] B. Jeong, H. Jang, W. Lee, C. Park, S. Ha, D. K. Kim, N.-K. Cho, *Journal of Cleaner Production* **2022**, *355*, 131756.
[6] M. Porru, M. Pisano, A. Serpi, F. Pilo in *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, **2020**, pp. 1–6.
[7] Boote Magazine **2024**.
[8] Fischer Panda, "Elektrischer Pod-Antrieb von Fischer Panda als Alternative zum Saildrive", can be found under https://www.fischerpanda.de/aktuelles-/-presse/pressmitteilungen/elektrischer-pod-antrieb-von-fischer-panda-als-alternative-zum-saildrive.
[9] Gerhard Hesse, "Elektromotoren auf Yachten: Antrieb, Leistung, Reichweite, Installation und Umrüstung", can be found under https://www.blauwasser.de/elektromotor-yacht-antrieb-leistung-reichweite-installation.
[10] Stakeholder der Sportbootsbranche, *Gesprächsleitfaden-Interview. Perspektive für emissionarme Antriebe bei Sportbooten*, **2025**.
[11] Candela, "Candela C8", can be found under https://candela.com/leisure-boats/candela-c-8/.
[12] *Hydriertes Pflanzenöl (HVO) als erneuerbarer Dieselkraftstoff*, **2024**.
[13] C.-Y. Lin, P.-C. Wu, H. Yang, *Gases* **2023**, *3*, 158–164.
[14] Agentur für erneuerbare Energien, "Wie wird Biodiesel hergestellt?", can be found under https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/wie-wird-biodiesel-hergestellt.
[15] Chemie.de.
[16] wvgw, "Wasserstoffherstellung: Verfahren, Auswirkungen, Perspektiven", can be found under https://wvgw.de/h2/wasserstoffherstellung/.
[17] Olaf Jedicke, *Vorlesung: Wasserstofftechnologie*.
[18] efuel-today, "Der Herstellungsprozess von E-Fuels", can be found under https://efuel-today.com/wie-werden-e-fuels-hergestellt/.
[19] X shore, "X Shore Boats", can be found under https://xshore.com/de/?utm_source=bing.com&utm_medium=organic.
[20] Rand, "Rand Boats", can be found under https://www.randboats.com/.
[21] Lasai, "Laisai Boats", can be found under https://lasai.com/de/.
[22] Hwila, "Hwila Boats", can be found under https://hwila25.se/.
[23] Axopar, "Axopar Boats", can be found under https://www.axopar.com/frontpage/.

[24] Frauscher, "Frauscher Boats", can be found under https://www.frauscherboats.com/.
[25] Yacht Magazin **2024**.
[26] Bodensee--schiffer-patent, "Geschwindigkeitsbegrenzungen auf dem Bodensee", can be found under https://www.bodenseeschifferpatent-a-d.de/bodensee-schifffahrts-ordnung/.
[27] [Der Titel "Ergebnisbericht-Wassersportstudie-BVWW-Stand2023-05-30" kann nicht dargestellt werden. Die Vorlage "Literaturverzeichnis - Zeitschriftenaufsatz - (Standardvorlage)" beinhaltet nur Felder, welche bei diesem Titel leer sind.]
[28] Deutschlandnetz, *Wie eine Schnellladesäule für Elektroautos funktioniert*.
[29] Yacht Magazin **2023**.
[30] ADAC, "Dieselpreis", can be found under https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/kraftstoffpreise/?sc_camp=471B2B419EF94B4FBA6034F0C1BA361E.
[31] clever tanken, "Wasserstoffpreis", can be found under https://www.clever-tanken.de/spritpreise/wasserstoff-preise.
[32] E-Fuels Alliance, "E-Fuels Preis", can be found under https://www.efuel-alliance.eu/efuels/costs-outlook.
[33] clever tanken, "HVOpreis", can be found under https://www.clever-tanken.de/spritpreise/hvodiesel-preise.
[34] ADAC, "Ladestrompreise", can be found under https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/.
[35] ISO AWI TS 25128, *Small craft — Main propulsion system energy consumption assessment,* can be found under https://www.iso.org/standard/89049.html#:~:text=This%20standard%20specifies%20the%20requirements%20for%20measurement%2C%20documentation%2C,system%20or%20power%2F%20energy%20source.%20Got%20a%20question%3F.
[36] ISO FDIS 23625, *Small craft — Lithium-ion batteries,* can be found under https://www.iso.org/standard/85220.html.
[37] ISO FDIS 16315, *Small craft — Electrical systems used for electrical propulsion,* can be found under https://www.iso.org/standard/84203.html.
[38] ISO NP TS 13297-3, *Small craft — Alternating and direct current installations of electrical systems Part 3: Lithium-ion charging,* can be found under https://www.iso.org/standard/89857.html.
[39] IEC 60364-7-709, *Low-voltage electrical installations - Part 7-709: Requirements for special installations or locations - Marinas and similar locations,* can be found under https://webstore.iec.ch/en/publication/1896.
[40] DIN VDE 0100-709, *Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 7-709: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Häfen, Marinas und ähnliche Bereiche – Besondere Anforderungen an die Versorgungseinrichtungen für den elektrischen Landanschluss von Schiffen,* can be found under https://www.vde-verlag.de/normen/0100559/din-vde-0100-709-vde-0100-709-2020-02.html.
[41] IEC 61439-7, *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 7: Assemblies for specific applications such as marinas, camping sites, market squares, electric vehicle charging stations,* can be found under

https://webstore.iec.ch/en/publication/67983#:~:text=Low-voltage%20switchgear%20and%20controlgear%20assemblies%20-%20Part%207%3A,vehicles%20%28AEVCS%29%20for%20Mode%203%20and%20Mode%204.

[42] DIN EN ISO 13297:2025-04, *Kleine Wasserfahrzeuge - Elektrische Systeme - Wechselstrom- und Gleichstromanlagen,* can be found under https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-13297/359950768.

[43] DIN EN 15869-1:2019 DE, *Fahrzeuge der Binnenschifffahrt - Elektrischer Landanschluss, Drehstrom 400 V, 50 Hz, bis 125 A,* can be found under https://webstore.ansi.org/standards/din/dinen158692019de#:~:text=Diese%20Europ%C3%A4ische%20Norm%20legt%20Anforderungen%20an%20elektrische%20Anlagen,Hz%20mit%20einer%20Stromst%C3%A4rke%20bis%20125%20A%20fest.

[44] W. Mell.

[45] Jonathan Köhler, *Politische Aspekte*.

[46] Electrive, "Neue Wasser-Umweltzone in Amsterdam: Verbrenner-Boote müssen draußen bleiben", can be found under https://www.electrive.net/2025/03/10/neue-wasser-umweltzone-in-amsterdam-verbrenner-boote-muessen-draussen-bleiben/#:~:text=Im%20Zentrum%20Amsterdams%20d%C3%BCrfen%20ab%20dem%201.%20April,Und%20auch%20f%C3%BCr%20den%20Durchgangsverkehr%20gibt%20es%20Ausnahmen.

[47] Presse- und Informationsamt des Landes Berlin, *Senat beschließt neues Wassertourismuskonzept für Berlin*.

[48] Bundesministerium für Verkher, "Förderprogramm zur nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen", can be found under https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/foerderrichtlinie-nachhaltige-modernisierung-binnenschiffe.html.

[49] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Maritime Forschungsstrategie 2025", can be found under https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/maritime-forschungsstrategie-2025.html.