

# Klimaneutrale Schifffahrt auf dem Bodensee

Machbarkeitsstudie 2023



Diese Studie wurde im Auftrag der Bayerischen Staatskanzlei und in Abstimmung mit der Internationalen Bodensee-Konferenz (IBK) erarbeitet. Die Durchführung der Studie erfolgte durch Prof. Dr. W. Tillmetz (Projektleiter), Petra Boeger und Winfried Hamann (alle Netzwerk h2connect.eco) im Zeitraum von März 2023 bis Dezember 2023.

Die Studie wurde auf der Basis aktuell verfügbarer Informationen und nach bestem Wissen erstellt. Die Autoren übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben und haften nicht für Schäden, die sich aus der Verwendung der in dieser Studie enthaltenen Informationen ergeben. Die Rechte an der Studie liegen bei der Bayerischen Staatskanzlei und den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung der Ergebnisse (Executive Summary).....	1
2.	Zielsetzung der Studie und Vorgehensweise.....	5
3.	Ermittlung der Emissionen .....	7
3.1	Ermittlung der Kraftstoffverbräuche und daraus resultierenden CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	7
3.2	Schadstoffemissionen .....	16
4.	Transformation Kraftstoffe, Infrastruktur und Antriebstechnologie.....	19
4.1	Energie- und Kraftstoffversorgung heute und morgen.....	19
4.2	Batterie-elektrische Antriebe und CO <sub>2</sub> -freier Strom.....	31
4.3	Wasserstofftechnologien .....	37
4.4	Motoren für flüssige, klimaneutrale Kraftstoffe .....	41
5.	Stakeholder-Beteiligung .....	47
5.1	Stakeholder-Treffen Sportboote.....	48
5.2	Stakeholder-Treffen Berufsschifffahrt.....	49
5.3	Die vielen weiteren Interessensgruppen .....	50
5.4	Interviews mit diesen Interessensgruppen .....	51
6.	Transformationsprozess.....	56
6.1	Heutiger regulatorischer Rahmen.....	56
6.2	Mögliche Maßnahmen für die Bodenseeschifffahrt .....	58
7.	Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise.....	75
8.	Anhang .....	78
8.1	Quellen und Literaturverzeichnis .....	78
8.2	Liste der beteiligten Organisationen.....	81
8.3	Abkürzungen .....	83
8.4	Fragenkatalog an Behörden, Verbände und Vereine .....	85
8.5	Protokolle .....	86
8.6	Abschätzung Kraftstoffverbräuche Vergnügungsboote (Szenario gemittelt) .....	87
8.7	Ermittlung der Kraftstoffverbräuche bei einer Versuchsfahrt.....	88

## 1. Zusammenfassung der Ergebnisse (Executive Summary)

Der Bodensee ist ein einzigartiger Lebens- und Wirtschaftsraum für mehr als vier Millionen Menschen, größter Trinkwasserspeicher Europas und beliebter Erholungsraum. Auf diesem internationalen Binnensee sind aktuell mehr als 38.000 Boote mit Verbrennungsmotoren zugelassen. Für die Binnenschifffahrt gibt es bis heute, anders als im Straßenverkehr, keine gesetzlichen Regelungen zur Emission von Treibhausgasen. Im Zusammenhang mit den immer dramatischeren Folgen des Klimawandels tritt auch die Klimaneutralität der Bodenseeschifffahrt in den Fokus der verantwortlichen Akteure.

Im Rahmen der Studie werden in einem ersten Schritt die Kraftstoffverbräuche in den verschiedenen Kategorien ermittelt beziehungsweise abgeschätzt. Die Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger (Kraftstoffe) und der dazugehörigen Antriebstechnologien werden in einem zweiten Schritt analysiert. Entscheidend für einen erfolgreichen Transformationsprozess hin zur Klimaneutralität ist die Einbindung der vielen am Thema beteiligten Interessensgruppen. Aus den gesammelten Erkenntnissen werden dann die verschiedenen möglichen Maßnahmen bewertet sowie die konkreten Schritte zur weiteren Vorgehensweise vorgeschlagen.

13.800 Motorsportboote mit Leistungen größer 37 Kilowatt, Fähren, die ganzjährig ein wichtiges Element des regionalen Verkehrs darstellen, sowie die saisonal, vorwiegend touristisch betriebenen Fahrgastschiffe, sind die drei Kategorien, die heute für etwa 90 Prozent des Verbrauchs an fossilem Kraftstoff verantwortlich sind. Daraus resultieren die entsprechenden Anteile an den CO<sub>2</sub>-Emissionen von jährlich etwa 52.000 Tonnen (siehe Abbildung 1.1).

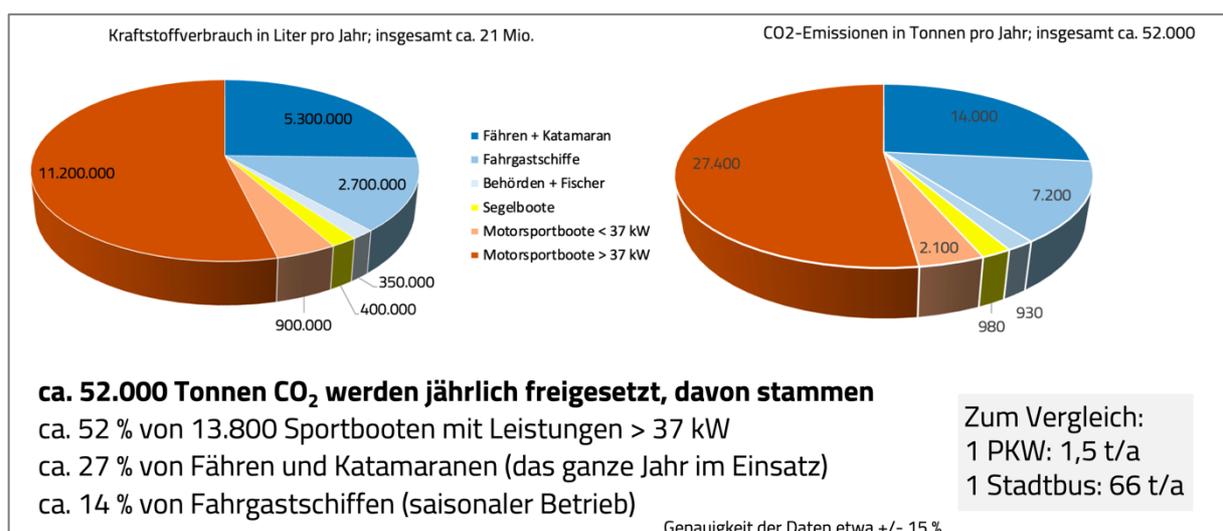


Abbildung 1.1: Jährliche Kraftstoffverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Schiffe auf dem Bodensee

Die Kraftstoffe sind heute zu einem sehr hohen Anteil fossilen Ursprungs und werden importiert. Motorsportboote werden zu 90 Prozent mit Benzin (Otto-Kraftstoff) betrieben, Fähren und Fahrgastschiffe mit Diesel-Kraftstoff. Die Lebensdauer der Schiffe von mehreren Jahrzehnten spielt eine wesentliche Rolle für den einzuschlagenden Transformationsprozess hin zur Klimaneutralität. Die Bodensee-Schiffahrtsbetriebe (BSB) haben sich in einer für alle nachahmenswerten Selbstverpflichtung zur Klimaneutralität entschlossen und signalisieren damit die Machbarkeit.

Für die Benzin-Motoren ist in den nächsten 15 Jahren kein klimaneutraler und in bestehenden Motoren verwendbarer Ersatz (E-Benzin) zum heutigen fossilen Kraftstoff in relevanten Mengen zu erwarten. Auch die Regelwerke der Europäischen Union sehen derzeit solche Kraftstoffe (RFNBO) primär für den Flugverkehr vor. Für Diesel-Motoren kann als Brückenlösung HVO-Kraftstoff verwendet werden, der aber ganzheitlich betrachtet nur sehr wenig zu einer positiven Klimabilanz beiträgt. Batterie-elektrische Schiffe sind aufgrund des hohen Gewichtes der Batterien nur für kurze Strecken und moderate Leistungen (Beispiel Solarschiff MS Insel Mainau) sinnvoll. Hinzu kommt, dass die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-freiem Strom im deutschen Stromnetz - insbesondere in der Bodensee-Region - zum bedarfsgerechten Laden der Batterien noch für viele Jahre begrenzt ist. Für lange Strecken mit akzeptablen Fahrzeiten wie beispielsweise Friedrichshafen – Konstanz sind flüssige, klimaneutrale Kraftstoffe die beste Lösung. E-Methanol, ein E-Fuel, das in der internationalen Seeschifffahrt eine immer wichtigere Rolle einnimmt, ist auch für die Bodenseeschifffahrt die attraktivste Lösung für einen Großteil der Bootstypen. Aufgrund der hohen Lebensdauer von Bestandsbooten ist eine Umrüstung auf klimaneutrale Antriebe besonders wichtig. Dafür sind Methanol-taugliche Motoren ebenfalls die bevorzugte Lösung. Die Versorgung mit E-Methanol, die Anpassung der Betankungsinfrastruktur und die Beschaffung der Methanol-Motoren erfordern eine gemeinsam von allen Beteiligten getragene und langfristig angelegte Strategie.

Die Interessen der am Thema beteiligten Stakeholder sind sehr vielschichtig und manchmal konträr. Wünsche von Motoryachtbesitzern, Werften oder Hafenbetreibern unterscheiden sich deutlich von denen der Berufs- und Hobbyfischer, Segler und Schwimmer oder denen der Anwohner und Urlaubsgäste. Verantwortliche für die Sicherstellung der Trinkwasserqualität oder für die Biodiversität haben wiederum eine andere Sichtweise. Die vielen Gespräche und Interviews zeigten ein sehr starkes Interesse an einem verstärkten Klima- und Umweltschutz. Insgesamt befürworteten fast alle eine gemeinsame, zielgerichtete Vorgehensweise zur Erreichung einer klimaneutralen Schifffahrt. Neben ausführlichen Informationen zu den aktuellen Entwicklungen und Kosten von klimafreundlichen Schiffsantrieben war der Wunsch nach eindeutigen, stabilen politischen Rahmenbedingungen zur Erreichung des Ziels vorherrschend. Letzteres ermöglicht die

so wichtige Planungs- und Investitionssicherheit für die vielen am Thema beteiligten und sehr innovativen Unternehmen.

Mit der vorliegenden Studie wurde erstmals ein ganzheitlicher Überblick zur Bodenseeschifffahrt unter dem Aspekt der angestrebten Klimaneutralität geschaffen. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Motorsportboote mit hoher Leistung (> 37 kW), Fähren und Fahrgastschiffe sind für etwa 90 Prozent des Kraftstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Auf diese drei Kategorien sollten sich die künftigen Maßnahmen fokussieren.
- Unter Beibehaltung der heutigen Fahrprofile (Geschwindigkeit, Entfernungen) ist die Klimaneutralität für die meisten Boote nur langfristig (bis 2040) mit flüssigen, CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen, bevorzugt E-Methanol, erreichbar. Dies ist auch die Lösung für die so wichtige Umrüstung der Bestandsflotte.
- Batterie-elektrische Antriebe sind nur für kurze Strecken und langsames Fahren sinnvoll. Aufgrund des hohen Energiebedarfs für lange Fahrstrecken oder schnelles Fahren sind rein batterie-elektrische Antriebe nicht zielführend. Eine für das bedarfsgerechte Laden der Batterien ausreichende Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-freiem Strom und die extrem teure Infrastruktur für hohe Ladeleistungen sind weitere Hürden. Für langsam fahrende Vergnügungsboote sind erste batterie-elektrische Antriebe verfügbar. Eine einfache Ladeinfrastruktur (2 kW Ladeleistung) in den Häfen ist für diese Antriebe wichtig.
- Elektro-Antriebe mit Brennstoffzelle und Wasserstoff sind für neue, größere Schiffe (Fähren) eine gute Option, erfordern allerdings lokal erzeugten oder importierten grünen Wasserstoff.

Eine professionell koordinierte und langfristig orientierte Vorgehensweise mit konkreten Meilensteinen und unter Einbeziehung aller Akteure ist entscheidend für die Akzeptanz und das Erreichen der Ziele. Innovationsstarke Unternehmen der Bodenseeregion könnten eine Schlüsselrolle spielen, um aus dem Nischenmarkt für Boote einen internationalen Treiber für klimaneutrale Binnenschiffe zu machen (Leuchtturmprojekt „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“). Ein intensiver Informationsaustausch und die Kommunikation mit allen Akteuren sollten die Aktivitäten begleiten.

Um diesen Prozess mit der gebotenen Eile zu starten, sind für den Transformationsprozess zahlreiche Maßnahmen nötig. Dafür sind Anpassungen der BSO, aber auch die Festlegung eines Zeitpunktes für das Ende der Nutzung fossiler Kraftstoffe auf dem Bodensee entscheidend.

In der Gipfelerklärung 2022 der Regierungschefs wurde für die Bodensee-Region vereinbart:

*'Wir setzen auf eine klimaneutrale Verkehrszukunft um den See und auf ihm. Ökologische und vernetzte Mobilität ist das Gebot der Stunde. Die Transformation soll möglichst schnell gelingen.'*

Die Autoren der Studie schlagen vor:

**Die Klimaneutralität für die Schifffahrt ist auf dem Bodensee für das Jahr 2040 anzustreben und nach der Verifikation der bevorzugten Technologie in etwa vier Jahren verbindlich festzulegen.**

Die verbleibenden 16 Jahre sind ein sinnvoller, aber auch notwendiger Zeitraum, um die Transformation sicher zu gestalten. Der Start für diesen äußerst anspruchsvollen Prozess muss allerdings sofort erfolgen und sollte sich auf die drei Kategorien fokussieren, die für den allergrößten Teil der Emissionen verantwortlich sind. Die Umrüstung der Bestandsflotte spielt eine entscheidende Rolle für das Erreichen des Ziels.

## 2. Zielsetzung der Studie und Vorgehensweise

Der Bodensee ist Lebens- und Wirtschaftsraum für mehr als vier Millionen Menschen, größter Trinkwasserspeicher Europas, ein wertvolles Ökosystem und beliebter Erholungsraum. Die private wie berufliche Schifffahrt auf dem Bodensee basiert heute fast ausschließlich auf verbrennungsmotorischen Antrieben mit fossilen Kraftstoffen. Während es für den Straßenverkehr immer striktere Regelwerke zum Klimaschutz gibt, ist dies für das Binnengewässer Bodensee bislang nicht der Fall. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung in allen Bereichen des Verkehrs analysiert die Studie die aktuellen Fakten und zeigt die notwendigen Maßnahmen auf, um auch der Binnenschifffahrt den Weg hin zur Klimaneutralität zu ermöglichen. Die hohe Dringlichkeit wird durch aktuelle Messdaten (Abbildung 2.1) der NASA deutlich sichtbar: Im September dieses Jahres hat der globale Temperaturanstieg das 1,5 Grad Ziel bereits deutlich überschritten. Nach dem Pariser Klimaschutzabkommen war das für das Ende des Jahrhunderts vorgesehen.

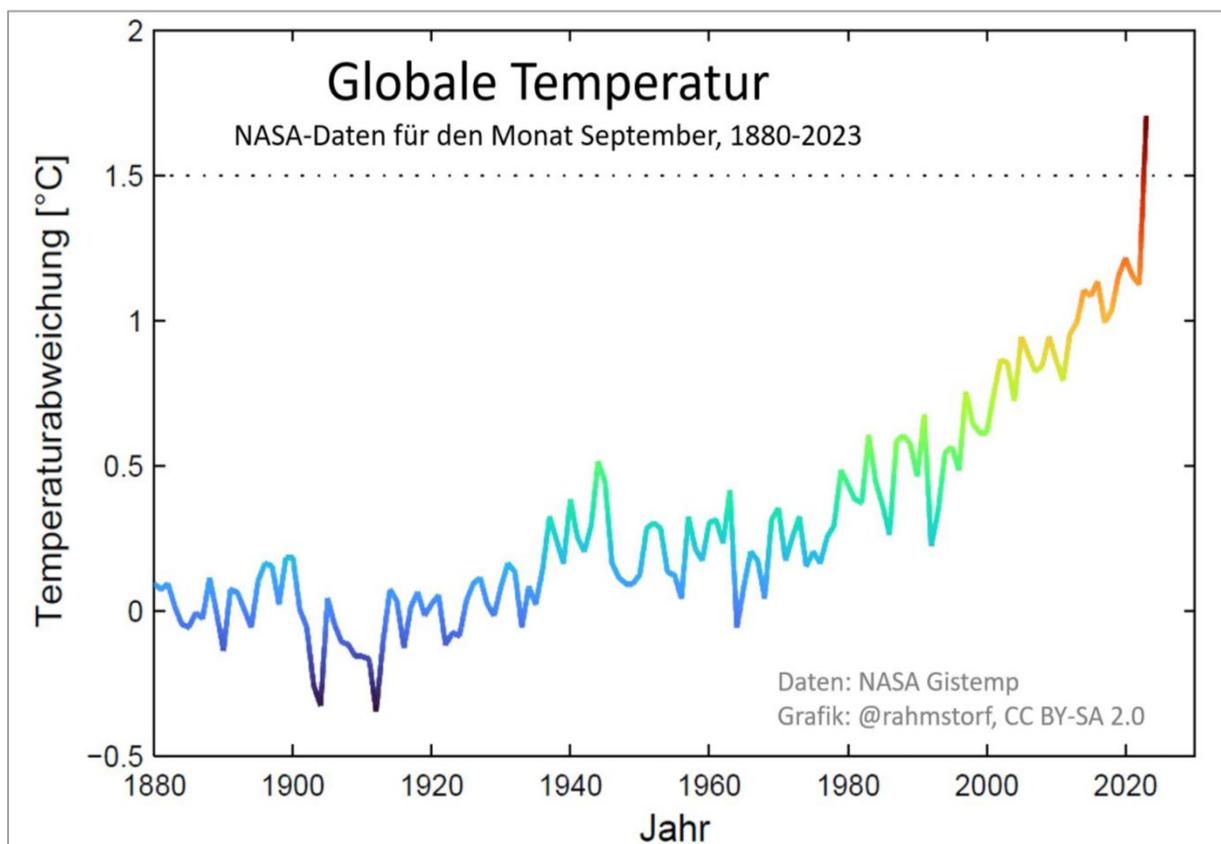


Abbildung 2.1: Weltweiter Temperaturanstieg für den Monat September seit dem Jahr 1880 (40)

Der größte Betreiber von Fahrgastschiffen und Fähren, die Bodensee-Schiffahrtsbetriebe GmbH (BSB), hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2035 alle seine Schiffe klimaneutral zu betreiben. Das 2022 in

Betrieb gegangene Solar-Elektroboot MS Insel Mainau ist ein erstes erfolgreiches Beispiel für den Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Schifffahrt. Bei den Motorsportbooten gibt es bislang nur wenige Aktivitäten in Richtung klimaneutraler Antriebe und Kraftstoffe. Der Verkauf von klimafreundlichem Diesel (Hydrogenated Vegetable Oil, HVO) an wenigen Seetankstellen, sowie einige kleine Demonstrationsboote sind erste Ansätze zu emissionsfreien Booten für den Freizeitbedarf.

Im Rahmen der Studie werden in einem ersten Schritt die aktuellen Emissionen durch die Berufsschifffahrt und die Sportboote analysiert und zusammengestellt (Ist-Situation). Dies erfolgt in enger Abstimmung mit den Schifffahrtsämtern, Ministerien und vielen weiteren verantwortlichen und fachkundigen Organisationen. Dabei liegt der Fokus auf den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die aus dem Verbrauch von Diesel und Benzin berechnet werden. Am Rande werden auch Schadstoffeinträge (Kohlenwasserstoffe) und der Einfluss von Wellen, die von Schiffen erzeugt werden, auf das Ökosystem betrachtet

In einem zweiten Schritt werden die heute verfügbaren klimafreundlichen Antriebstechnologien und Kraftstoffe einschließlich der notwendigen Infrastruktur anwendungsspezifisch recherchiert und bewertet (Transformationspfade). Dabei geht es um eine ganzheitliche Betrachtung wie beispielsweise der Erzeugung von CO<sub>2</sub>-freiem Strom, dessen Verfügbarkeit und die erforderliche Infrastruktur zum Laden.

Ein zentrales Element der Studie ist die Einbindung möglichst aller vom Thema betroffenen Interessensgruppen. Das reicht von den Bewohnern und Touristen der Bodenseeregion über Forschungsinstitute, Vereine und Verbände bis hin zu den Werften und Hafenbetreibern. Aber auch regionale Unternehmen, die durch Innovationen den Transformationsprozess aktiv mitgestalten können, werden in die Studie einbezogen. Die Erwartungshaltung der Stakeholder zu analysieren und die Akzeptanz der notwendigen Maßnahmen zu hinterfragen sind wesentliche Bestandteile dieser Aktivität.

Die Darstellung und Bewertung möglicher Transformationspfade hin zu einer klimaneutralen Schifffahrt auf dem Bodensee bestimmen den abschließenden Teil der Studie. Das beinhaltet auch geeignete flankierende Maßnahmen, um den Transformationsprozess erfolgreich zu gestalten.

### 3. Ermittlung der Emissionen

#### 3.1 Ermittlung der Kraftstoffverbräuche und daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen

Das zunächst wichtigste Dokument zur Ermittlung der Kraftstoffverbräuche ist die Zulassungsstatistik der Schifffahrtsämter. Abbildung 3.1 zeigt die Zusammenfassung der Zulassungszahlen über alle Zulassungsstellen am Bodensee. Die im Auftrag der ISKB jährlich erstellte Statistik enthält auch die Werte der einzelnen Zulassungsstellen sowie Daten zur Abgastypisierung der Antriebe und ist auf den Seiten der Zulassungsstellen im Internet abrufbar (1).

Art des Wasserfahrzeuges (Wfzg)	Gesamtanzahl	gesamte Antriebsleistung Wfzg [kW]							
		bis 4,4	>4,4 bis 7,4	>7,4 bis 37	>37 bis 74	>74 bis 100	>100 bis 250	>250 bis 500	>500
Fahrgastschiffe	85				3	2	32	17	31
Lastschiffe mit Dieselmotor(en)	11					1	10		
Arbeits-, Berufsfischerboote und sonstige Boote	138		2	6	32	12	44	24	18
mit Dieselmotor(en)	295	55	7	158	45	8	19	3	
mit 4-T-Ottomotor(en)	4	3	1						
mit 2-T-Ottomotor(en)	2554	17	15	200	314	401	1156	402	49
Motorboote	23580	5738	501	5914	3460	957	6232	746	32
mit Dieselmotor(en)	307	209	23	28	47				
mit 4-T-Ottomotor(en)	5923	314	1682	3830	93	2	2		
mit Dieselmotor(en)	4737	3809	646	259	23				
mit 4-T-Ottomotor(en)	502	414	82	2	4				
mit 2-T-Ottomotor(en)	14544								
kennzeichnungspflichtige Segelboote ohne Motor	20	1	5	8	2	1	2	1	
mit Dieselmotor(en)	263	179	1	31	44		8		
mit 4-T-Ottomotor(en)	1		1						
mit 2-T-Ottomotor(en)	2152	2065	45	36	2		3	1	
Boote mit Elektromotor(en)	22	16	1	5					
Dampfboote									
alternative Antriebe									
kennzeichnungspflichtige Ruderboote, Pedalos etc. o. Motor	5753								
a) Wfzg mit Dieselmotor(en) gesamt	8731	332	1704	4044	444	419	1246	444	98
b) Wfzg mit 4-T-Ottomotor(en) gesamt	28875	9781	1155	6362	3572	965	6259	749	32
c) Wfzg mit 2-T-Ottomotor(en) gesamt	814	626	107	30	51				
Summe Wfzg mit Verbrennungskraftmaschine(n) (a + b + c)	38420	10739	2966	10436	4067	1384	7505	1193	130
Gesamtanzahl aller Wasserfahrzeuge	60891								

Abbildung 3.1: Zulassungsstatistik der Bodenseeschiffe zum 31.12.2022 (1)

Von den 60.891 Schiffen, die aktuell für den Bodensee zugelassen sind, haben 38.420 eine Verbrennungskraftmaschine an Bord. Zahlenmäßig dominieren die 4-Takt-Ottomotoren in 28.875 Schiffen. Bei der Auflistung nach Leistungsklassen fällt auf, dass 24.141 oder 63 Prozent der Motoren im Leistungsbereich bis 37 kW (37 Kilowatt, das entspricht 50 PS) zu finden sind. In dieser Leistungsklasse finden sich auch die 2.146 Elektromotoren, das sind etwa 9 Prozent aller Antriebe in dieser Kategorie. Diese Elektromotoren werden häufig in Segelbooten als sogenannte „Flautenschieber“ eingesetzt. Bei größeren Leistungen sind Elektroantriebe noch die Ausnahme (Beispiel MS Mainau mit 2 mal 75 kW E-Motoren).

13.796 (52 Prozent) aller 26.441 Motorboote im Bereich der Vergnügungsfahrzeuge liegen im Leistungsbereich oberhalb von 37 kW. Grob geschätzt handelt es sich bei etwa 90 Prozent dieser

Boote um sogenannte Gleiter. Dies wird bei der Ermittlung der Verbrauchswerte noch eine wesentliche Rolle spielen.

Ein Vergleich mit der Zulassungsstatistik 2010 zeigt, dass die Gesamtzahl der zugelassenen Schiffe in diesen 12 Jahren nur um etwa 7 Prozent gestiegen ist. Bei den Booten mit Verbrennungsmotor ist der Zuwachs mit 6 Prozent ähnlich hoch. Auffallend ist der Zuwachs bei Motorbooten mit einer Leistung von mehr als 37 kW. Zu den 9.659 Schiffen vor 12 Jahren sind 4.137 neue Schiffe hinzugekommen – was einem Zuwachs von 43 Prozent entspricht. Dieser Trend hin zu vielen großen und schnellen Yachten ist auch in den Häfen gut zu beobachten. Leichtbauweise (GFK-Rümpfe) und sehr leistungsstarke, kompakte Motoren haben diese Entwicklung in den letzten Jahrzehnten weltweit geprägt. Im Jahr 2010 gab es bereits 777 Boote mit Elektromotor. Ihre Zahl hat sich bis heute fast verdreifacht. Bei den Fahrgastschiffen stieg in den letzten 12 Jahren die Zahl um 16 Einheiten oder rund 23 Prozent.

In Abbildung 3.2 wird der oben genannte Trend zu leistungsstarken 4-Takt-Motoren ebenfalls deutlich. Aus den Veränderungen seit 1992 lässt sich auch ein weiterer, wichtiger Aspekt ableiten. Vor 30 Jahren wurde durch eine verschärfte Abgasregelung in der BSO das Ende der 2-Takt-Motoren mit ihren sehr hohen Kohlenwasserstoff-Emissionen eingeläutet. Auch wenn die meisten dieser Antriebe inzwischen verschwunden sind, fahren heute noch immer 814 Boote mit 2-Takt-Motoren auf dem See. Im Jahr 2010 waren es noch 2.610 Boote mit dieser Antriebsart. Auch bei den Abgasvorschriften für die 4-Takter- und Diesel-Motoren (Abbildung 3.3) ist der sehr langsame Veränderungsprozess aufgrund der sehr hohen Lebensdauer der Boote erkennbar.

Für die in der Studie zu betrachtende Klimaneutralität bis 2040, also in 16 Jahren, wird die Frage der Lebensdauer der Bestandsboote ein entscheidender und herausfordernder Aspekt sein: Im Gegensatz zu PKW mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 9,8 Jahren (2) sind es bei Schiffen 30 bis 50 Jahre.

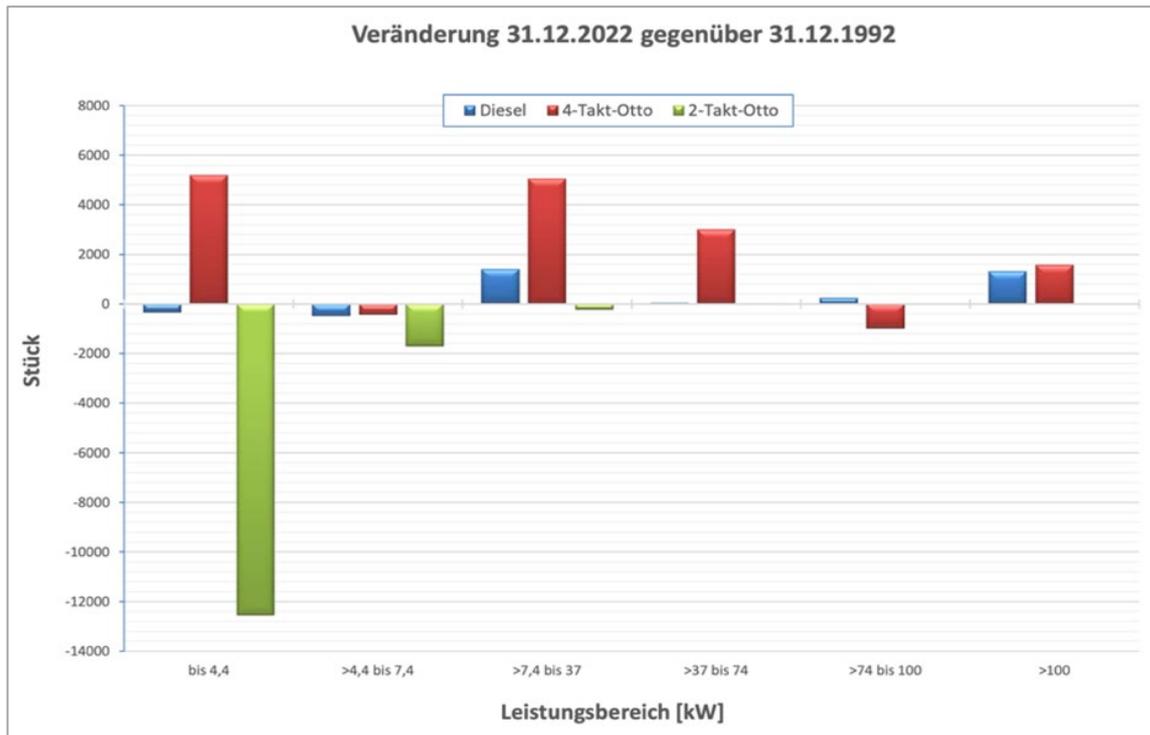


Abbildung 3.2: Veränderungen der Motorentechnologie über die letzten 30 Jahre in Abhängigkeit von den Leistungsklassen (1)

Die Zulassungsstatistiken lassen allerdings keine direkten Rückschlüsse auf die Kraftstoffverbräuche und damit auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu. Um diese zu ermitteln, wurden folgende Fragen über die Geschäftsstelle der IBK an die zuständigen Stellen rund um den Bodensee versandt. (Der komplette Fragenkatalog findet sich in Kapitel 8.4.) Zur Ermittlung der Kraftstoffverbräuche wurde folgende Frage gestellt:

1. *Gibt es in Ihrem Verantwortungsbereich Daten zu den Verbräuchen in der Schifffahrt und können Sie uns diese mitteilen? Das können auch die jährlichen Abgabemengen an den öffentlichen und privaten Tankstellen für Schiffe (Fähren, Fahrgastschiffe, Behördenboote, Sportboote etc.) sein. Bei den Daten wäre auch die Entwicklung des Verbrauches über die letzten Jahre hilfreich. Falls Ihnen keine oder nur teilweise Daten vorliegen, kennen Sie Organisationen, die uns hier weiterhelfen können?*

In der Kategorie der Berufsschiffe war der Rücklauf zu den Verbräuchen sehr hoch. Die fehlenden Werte konnten plausibel geschätzt werden. Die dadurch etwas reduzierte Genauigkeit der Verbrauchszahlen ist für den Zweck der Studie völlig ausreichend. Im Rahmen des Stakeholder-

Treffens am 18.8.23 (siehe Protokoll Kapitel 8.5) wurden die Angaben noch ergänzt und final angepasst.

In Abstimmung mit den Teilnehmern des Treffens wurde die Berufsschifffahrt in drei Kategorien gegliedert, für die sich die entsprechenden Verbräuche ergeben (siehe Abbildung 3.4):

- Fähren und Katamarane (KN-FN), die das ganze Jahr im Einsatz und wichtige öffentliche Verkehrsträger sind, verbrauchen jährlich etwa 5,2 Millionen Liter Diesel. Der Fährbetrieb KN-FN, der rund um die Uhr im Betrieb ist, macht mit 3,2 Millionen Liter Diesel den weitaus größten Anteil aus.
- Die Fahrgastschiffe, die saisonal (April bis Oktober) in der Touristik eingesetzt werden, verbrauchen mit 2,7 Millionen Litern Diesel etwa die Hälfte.
- Bei Behörden-, Fischer- und sonstigen beruflich genutzten Booten beläuft sich der Verbrauch auf ca. 350.000 Liter, überwiegend Dieselkraftstoff.

Bei den Sportbooten (Vergnügungsfahrzeuge) gestaltet sich die Bestimmung der Verbräuche deutlich schwieriger. Die jährlichen Abgabemengen der Seetankstellen konnten nur teilweise ermittelt werden. Diese Zahlen sind auch nur sehr begrenzt aussagekräftig, da viele der Boote über Kanister oder Tankwagen betankt werden. Motorsportboote, die regelmäßig über die Slip-Anlagen ins Wasser gelassen werden, können vorher (auf dem Anhänger) an öffentlichen Straßentankstellen betankt werden. Dies ist in der Regel deutlich preiswerter als an den Seetankstellen. Insgesamt erscheint es nahezu unmöglich, die von den etwa 38.000 Sportbooten verbrauchten Kraftstoffmengen genau zu ermitteln.

In Folge können die Verbräuche nur über Berechnungen abgeschätzt werden. Ein wichtiger Parameter hierfür sind die jährlichen Betriebsstunden der Sportboote. Hierzu hatten die Schifffahrtsämter Durchschnittswerte ermittelt, die dann in der ISKB-Sitzung vom 17./18.11.2022 für die Machbarkeitsstudie festgelegt wurden: 29,77 Stunden bei Motorbooten und 17,04 Stunden bei Segelbooten.

Der andere entscheidende Parameter zur Ermittlung der Verbräuche ist der boots- oder antriebsspezifische Verbrauch. Im Gegensatz zu PKW und LKW, bei denen die Verbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen über standardisierte Fahrzyklen und Prüfbedingungen ermittelt werden, gibt es für Schiffe bisher keine verbindlichen und für die Analyse nutzbaren Regelwerke. Erst mit der EU-Sportbootrichtlinie wurde ein Testzyklus für die Motoren definiert. Die Richtlinie bezieht sich jedoch nur auf Grenzwerte bei den Schadstoffen (HC, NO<sub>x</sub>) und nicht auf die Verbräuche oder CO<sub>2</sub>-Emissionen. Angaben zum typischen Verbrauch eines Bootes sind auch in den Broschüren oder Dokumenten der Bootshersteller nur sehr selten zu finden. Hinzu kommt, dass der Verbrauch sehr

stark vom Bootstyp, dem individuellen Fahrprofil und der Antriebsleistung abhängt. Dies führt zwangsläufig zu vielen Diskussionen über die tatsächlichen Kraftstoffverbräuche.

Für die Bewertung der Kraftstoffverbräuche ist die Betrachtung einiger grundlegender physikalischer Zusammenhänge sehr hilfreich: Ein Verdränger-Boot hat in Abhängigkeit von der Rumpflänge eine maximale Rumpfgeschwindigkeit, bis zu der der Kraftstoffverbrauch nur langsam ansteigt (braune Kurve in Abbildung 3.3). Bei einem sogenannten Gleiter wird das gesamte Boot mit sehr viel Motorleistung (hoher Kraftstoffverbrauch pro Stunde; steiler Anstieg der roten Kurve) aus dem Wasser gehoben, bis es in die stationäre Gleitfahrt kommt, bei der der Anstieg der Leistung (oder des Kraftstoffverbrauches pro Stunde) mit zunehmender Geschwindigkeit wieder geringer wird (rote Kurve und gelbe Markierung). So verbraucht ein Gleiter in der Gleitfahrt ein Vielfaches an Kraftstoff als ein vergleichbares Verdränger-Boot (bezogen auf den Verbrauch pro Stunde). Der große Unterschied ist aus dem Abstand der beiden gestrichelten Linien zu erkennen.

Ein häufig angeführtes Argument ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs aufgrund des geringen Fahrwiderstandes beim Gleiten. Bei diesen Aussagen wird allerdings der Verbrauch pro Kilometer Fahrstrecke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit betrachtet. Der Unterschied zwischen den beiden Betrachtungsweisen (bezogen auf den Verbrauch pro Stunden oder den Verbrauch pro Kilometer) ist in den Grafiken zur Auswertung einer Versuchsfahrt zur Verbrauchsermittlung in Kapitel 8.7 dargestellt. Während der Verbrauch pro Stunde mit zunehmender Geschwindigkeit stetig (mit unterschiedlichem Gradienten) ansteigt, fällt er beim Verbrauch pro gefahrene Kilometer beim Übergang in das Gleiten. Nachdem für die Ermittlung der Kraftstoffverbräuche der Boote nur die Zahl der Betriebsstunden (siehe unten) zur Verfügung steht, erübrigt sich die Betrachtung der Verbräuche in Abhängigkeit von der Zahl der gefahrenen Kilometer. Für den Freizeitsport macht auch die Analyse der jährlich auf dem See zurückgelegten Kilometer weniger Sinn. Anders verhält es sich bei Fahrgast- oder Frachtschiffen. Hier gibt es in der Binnenschifffahrt allerdings nur Verdränger-Boote, auch aus wirtschaftlichen Gründen.

Bei Tragflügel-Booten (grüne Kurve in Abbildung 3.3) verringert sich aufgrund der extremen Reduzierung des Fahrwiderstandes auch der Kraftstoffverbrauch pro Stunde. Hier muss allerdings beachtet werden, dass der Energieaufwand zum „Herausheben des Schiffes aus dem Wasser“ extrem hoch ist und erst durch sehr lange Fahrten bei hoher Geschwindigkeit kompensiert werden kann. Auf dem Bodensee sind dafür die typischen Fahrstrecken zu kurz. Beim schnellen Fahrgasttransport zwischen Mittelmeer-Inseln sind die Fahrstrecken sehr hoch. Daher wird diese Technologie dort auch häufig eingesetzt.

90 Prozent aller Motorsportboote mit mehr als 37 kW Leistung auf dem Bodensee sind Gleiter-Boote. Aufgrund der Größe und des Gewichtes dieser Boote (bis zu 20 Tonnen) haben die Motoren eine Leistung von bis zu 900 kW, um die Gleitfahrt zu ermöglichen. Typische Kennzahlen für die notwendige Leistung zum Betrieb von Verdränger-Booten liegen bei ca. 5 kW pro Tonne, die von Gleitern bei ca. 60 kW pro Tonne. Die Verbräuche von Gleitern liegen dann im Bereich von bis zu 170 l/h bei der zugelassenen maximalen Geschwindigkeit von 40 km/h auf dem Bodensee. Rechnet man diesen Verbrauch auf Liter pro 100 Kilometer um, dann ergeben sich Werte, die bei Gleitern je nach Boot zwischen 40 und 400 Litern pro 100 km liegen. Das ist um den Faktor 10 bis 30 höher als bei einem PKW, oder einem vergleichbaren Boot im Verdränger-Betrieb (Rumpfgeschwindigkeit). Die Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die verschiedenen Leistungsklassen ist in Abbildung 6.2 dargestellt und gibt einen weiteren Hinweis auf den extremen Einfluss des Gewichtes auf den Kraftstoffverbrauch von Gleitern.

Aus diesen Zusammenhängen resultiert auch die Diskussion um eine Geschwindigkeitsbegrenzung für Sportboote. Würde diese im Bereich der typischen Rumpfgeschwindigkeit (12 km/h) liegen, könnte der Verbrauch um etwa 75 Prozent reduziert werden. Auf dieses Thema wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

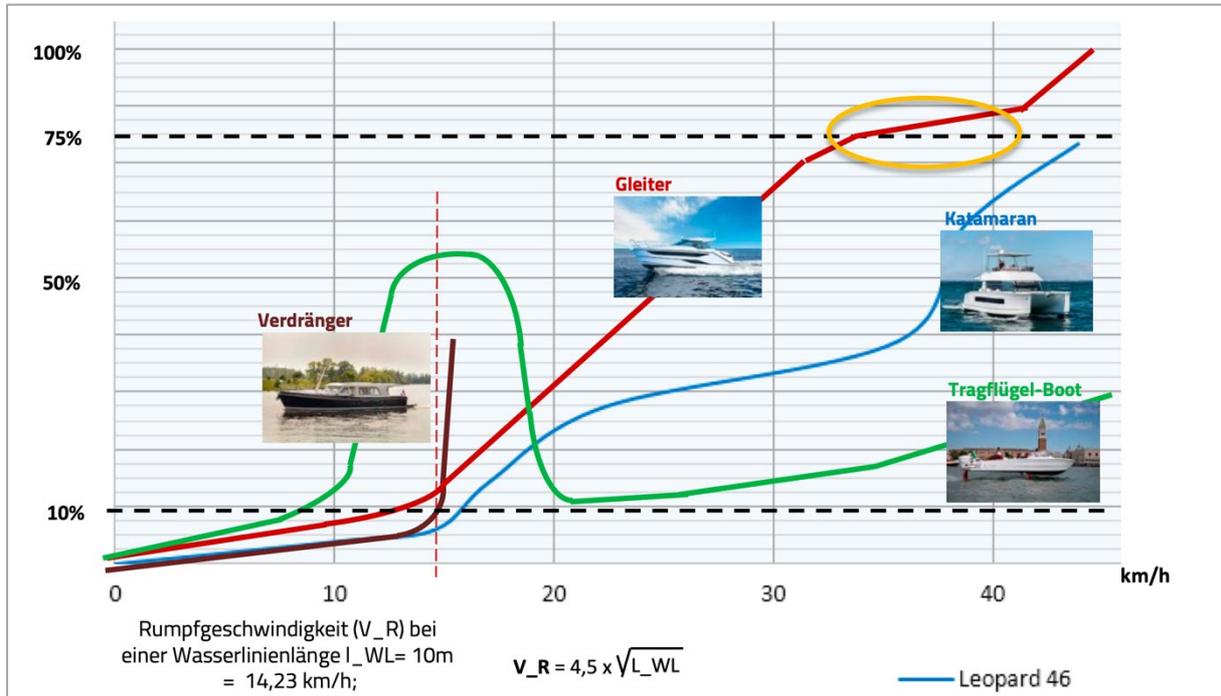


Abbildung 3.3: Prinzip-Darstellung, um die notwendige Antriebsleistung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für verschiedene Bootstypen zu vergleichen (Prozentuale Auftragung im Verhältnis zur maximalen Leistung eines Gleiters)

Im Rahmen der Erstellung der Studie gab es einen intensiven Diskurs mit einigen Interessensgruppen zur Berechnung (oder besser Abschätzung) der Verbräuche. Diese Diskussion resultiert aus der Frage nach dem typischen, realitätsnahen Fahrprofil: welcher Anteil der Betriebszeit entfällt auf Leerlauf, Teil-Last, Gleitfahrt oder Voll-Last? So wurde für die Abschätzung der von der ISKB ermittelte Mittelwert von 30 Betriebsstunden der Motoren pro Jahr herangezogen (siehe Tabellen in Kapitel 8.6). Beim Fahrprofil wurden 13 Prozent Leerlauf und 16 Prozent Voll-Last angenommen. Der Teil-Last-Anteil liegt dann bei 71 Prozent. Für den Verbrauch wurden bei Teil-Last 40 Prozent des Verbrauches bei Voll-Last angenommen. Das ist ein Mittelwert aus dem Verbrauch beim Gleiten, der bei etwa 70 Prozent der Voll-Last liegt, und dem Verbrauch bei der Fahrt mit Rumpfgeschwindigkeit, der bei etwa 10 Prozent des Voll-Last-Verbrauches entspricht (siehe Abbildung 3.3.). Im Leerlauf liegt der Verbrauch bei 3 Prozent der Voll-Last. Bei der Leistung wurde im Szenario „gemittelt“ der Mittelwert der jeweiligen Zulassungskategorie verwendet. Für die Kategorie von 37 kW bis 74 kW also 55,5 kW. Bei den großen (schweren), leistungsstarken Booten ist der Verbrauch bereits bei mittlerer Leistung sehr hoch. Voll-Last sollten die sehr leistungsstarken Boote eigentlich nicht fahren, solange sie die Geschwindigkeitsbegrenzung auf dem Bodensee (40 km/h) einhalten. Im „plausibilisierten“ Szenario wurde dies berücksichtigt und führt zu einer Reduktion des geschätzten Gesamtverbrauches um ca. 15 Prozent (siehe auch Abbildung 6.2). Werden diese Boote allerdings zum Wasserskifahren und Wake Boarden benutzt, fahren sie lange Zeiten im Voll-Lastbereich, was zu einem starken Anstieg des Verbrauches führt. Andererseits wird, je kleiner das Boot und die Leistung des Motors ist, der Anteil an hohen Lasten und damit an hohen spezifischen Verbräuchen deutlich größer sein als in den Berechnungen angenommen wurde. Abschließend sollte festgehalten werden, dass die für die Studie abgeschätzten Verbräuche (Kapitel 8.6) der Sportboote nur mit einer Genauigkeit von etwa 15 Prozent die Realität wiedergeben. Für die grundlegenden Aussagen ist das vollkommen ausreichend.

Nimmt man das Szenario „gemittelt“ für die Sportboote heran, ergibt sich ein jährlicher Kraftstoffverbrauch von 11,2 Millionen Litern für die Motorsportboote mit mehr als 37 kW Leistung und 900.000 Litern für die Sportboote mit weniger als 37 kW Leistung. Hinzu kommen ca. 400.000 Liter für die Segelboote (siehe Abbildung 3.4 und Kapitel 8.6). Etwa 90 Prozent der Verbräuche der Sportboote entfallen auf Benzin-, der Rest auf Dieselmotoren. Durch Veränderung der Annahmen (Szenarien) ändern sich die errechneten Verbräuche um bis zu 15 Prozent nach oben oder unten. Die resultierenden Unsicherheiten bei der Abschätzung der Verbräuche haben aber keinen grundlegenden Einfluss auf die Schlussfolgerungen der Studie, wie sich aus Abbildung 3.4. leicht ableiten lässt: Sollten die Verbräuche der Motorsportboote unter 10 Millionen Liter liegen, wäre dies immer noch die dominierende Kategorie.

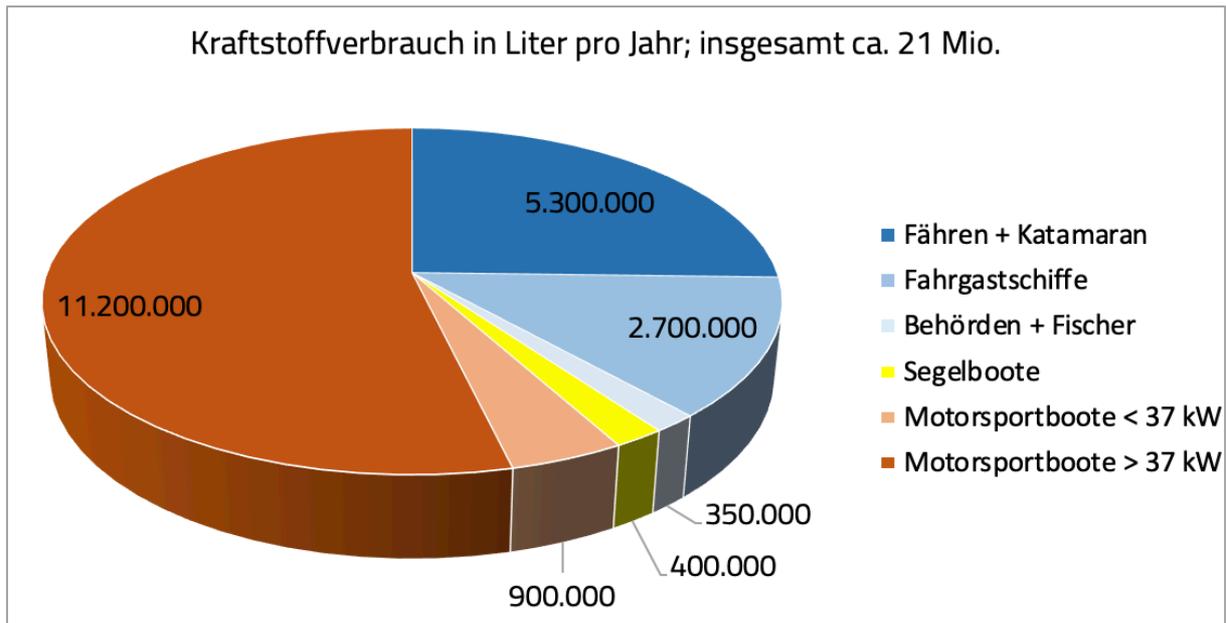


Abbildung 3.4: Kraftstoffverbrauch der Schiffe auf dem Bodensee

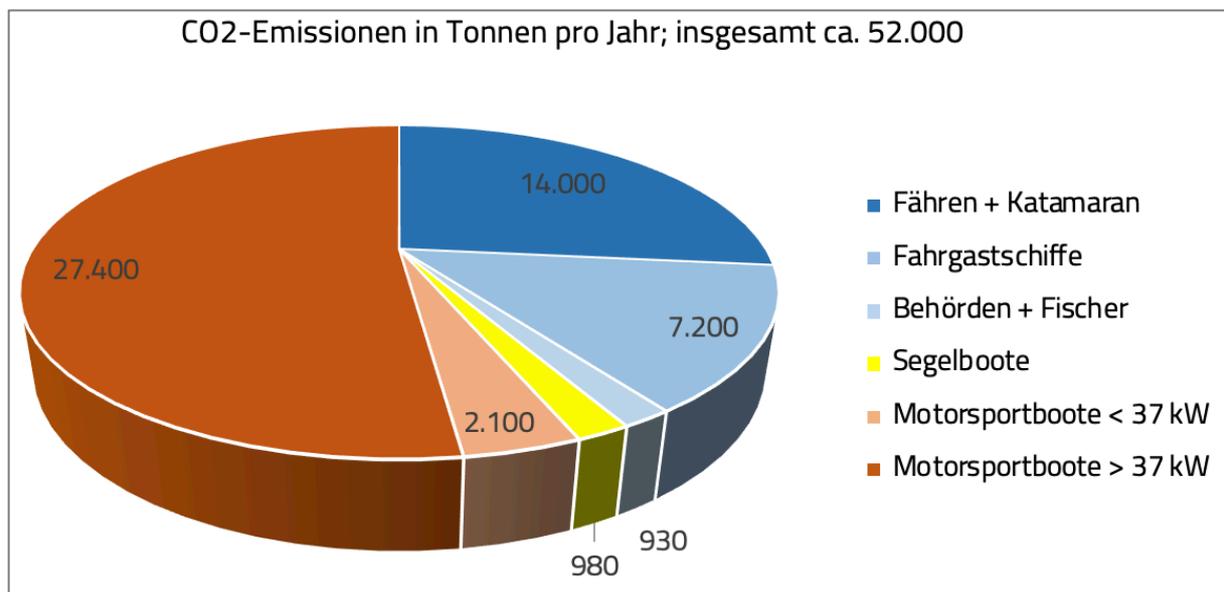


Abbildung 3.5: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Schiffe auf dem Bodensee

Aus den Kraftstoffverbräuchen lassen sich einfach durch Multiplikation mit dem Faktor 2,65 für Diesel und 2,37 für Benzin die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Kilogramm berechnen (Abbildung 3.5.) Von den insgesamt etwa 52.000 Tonnen CO<sub>2</sub>, die jährlich freigesetzt werden, stammen etwa

- 52 Prozent von den 13.800 Sportbooten mit Leistungen > 37 kW und das trotz der geringen Nutzungsdauer des Motors von etwa 30 Stunden im Jahr
- 27 Prozent von den Fähren und Katamaranen, die das ganze Jahr im Einsatz sind, und
- 14 Prozent entfallen auf die Fahrgastschiffe im saisonalen Betrieb

Bei der Umstellung auf klimaneutrale Antriebe sollten diesen drei Kategorien die größte Priorität eingeräumt werden. Um die Zahlen einordnen zu können, ist folgender Vergleich hilfreich: ein moderner PKW erzeugt etwa 1,5 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr (EU Flottengrenzwert), ein Stadtbus etwa 66 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

### 3.2 Schadstoffemissionen

Während es beim Kraftstoffverbrauch und der damit verbundenen Emission von CO<sub>2</sub> bis heute keine Regelungen für die Binnenschifffahrt gibt, hat die BSO in Bezug auf Schadstoffe über die Jahre hinweg Vorschriften erlassen. Dieses Thema ist zwar nur indirekt mit der Aufgabenstellung „Klimaneutrale Schifffahrt“ verbunden, soll aber hier doch kurz betrachtet werden: Vor allem die Emissionen von Kohlenwasserstoffen hängen stark mit den leistungsstarken Benzin-Motoren zusammen. Mit der Einführung von 3-Wege-Katalysatoren bei Benzinmotoren sinkt nicht nur die HC-Emission, sondern auch der Verbrauch. Auch die historische Entwicklung im Vergleich zum Straßenverkehr lässt interessante Rückschlüsse zu.

Die ISKB hat sich Anfang der 1990er Jahre erstmals mit der Einführung von Abgasvorschriften für den Bodensee auseinandergesetzt und 1991 die Abgasvorschriften nach der Anlage C zur BSO beschlossen. In Folge wurden 1991 die Stufe 1 und zum 01.01.1996 die Stufe 2 der Anlage C umgesetzt (3).

Hieraus resultiert in der Praxis, dass heute viele, vor allem größere Innenbord-Antriebe über entsprechende Katalysatorsysteme verfügen, auch wenn diese nicht explizit in der BSO verpflichtend vorgeschrieben sind. Mit dem Einbau solcher Systeme wird aufgrund der zusätzlichen Oxidation eine Reduzierung der HC-Werte, sowie durch eine Überwachung der Abgaszusammensetzung eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch eine geregelte Verbrennung erreicht.

Die vielen Außenborder mit Leistungen bis zu 74 kW (100PS) müssen auch bei neuen Aggregaten die schärferen BSO 2 Regeln nicht erfüllen. Außenborder mit Abgaskatalysator werden nur von sehr wenigen Herstellern angeboten.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die HC-Emissionen durch die Abgasvorschriften begrenzt wurden (3, 4). Seit 1996 musste sukzessive von Vergaser- auf geregelte Einspritztechnik umgestellt werden.

Mit Einführung der Anlage C zur BSO wurde festgelegt, dass Benzin-Motoren, zugelassen nach BSO Stufe 1 und 2, alle 3 Jahre im Zuge der Nachuntersuchung nachgemessen werden müssen. Mit der Novellierung der neuen BSO im Jahr 2022 ist die Pflicht der Nachmessung aus dem Gesetz gestrichen worden. Hintergrund ist, dass inzwischen immer mehr Motoren nach der EU-Sportbootrichtlinie (4) zugelassen werden können und diese keine Nachmessung vorsehen. Die

Motorenhersteller müssen im Zulassungsbereich der Sportbootrichtlinie die Abgasstabilität durch Langzeittest nachweisen.

Vergleicht man die Entwicklung der Abgasvorschriften mit den aktuell auf dem Bodensee zugelassenen Motoren, so zeigt sich, dass nach 30 Jahren immer noch viele Boote bzw. Motoren im Einsatz sind, die regelmäßig überholt werden und somit nach den alten Emissions- und Verbrauchswerten weiter genutzt werden. Auch Abgasstufe 1 und 2 sind 30 bzw. 27 Jahre alt. Zum Vergleich: die Euro1 Norm für PKW und LKW wurde ebenfalls 1993 eingeführt, allerdings bis heute (Euro 6d) achtmal verschärft. Vergleicht man beispielsweise grob die Kohlenwasserstoff-Emissionen, so muss ein Benzin-PKW nach Euro 6 einen Grenzwert bei den HC-Emissionen (NMHC) von ca. 0,068g/kWh einhalten. Das ist etwa um den Faktor 10 niedriger als bei Schiffsmotoren nach der BSO 2.

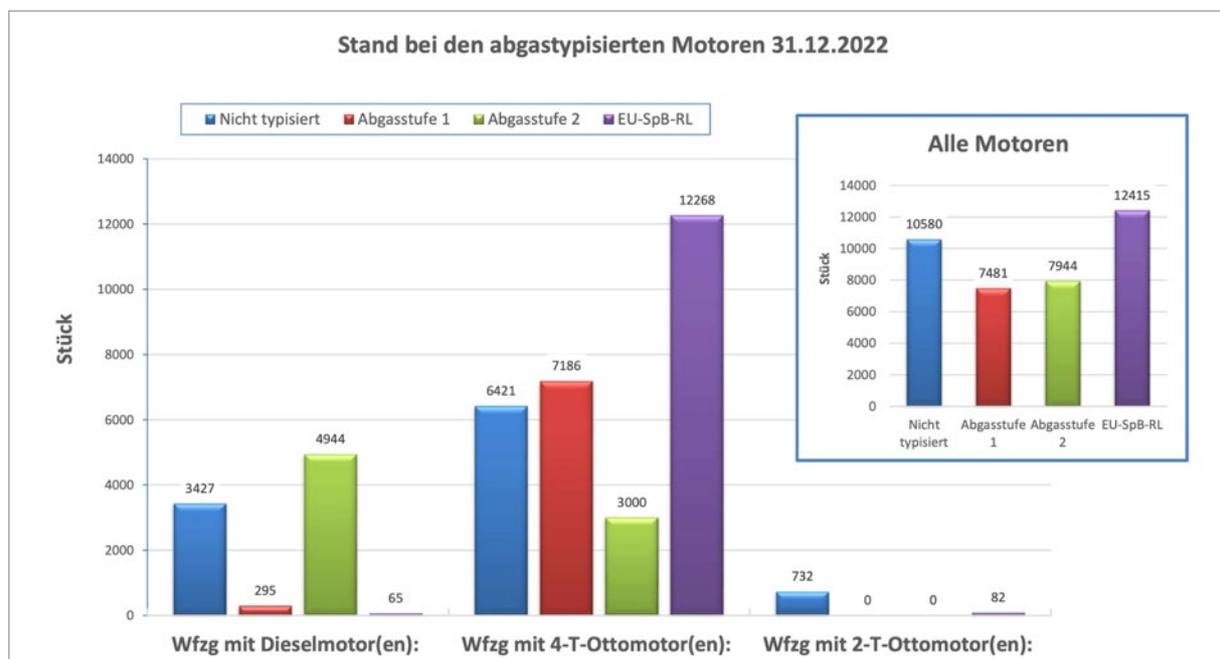


Abbildung 3.6: Aktueller Stand der Abgastypisierung (1)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Motorboote sehr große Mengen an Kohlenwasserstoffen (direkt über die Auspuffanlage) in den Bodensee eingetragen werden. Aus den Emissionsgrenzwerten abgeleitete Schätzungen ergeben, dass auf diese Weise bis zu 100 Tonnen Kohlenwasserstoffe pro Jahr in den See gelangen. Nach Aussagen des Seeforschungsinstituts werden trotzdem die Grenzwerte eingehalten. Dies gilt im Übrigen auch für andere Schadstoffe. Hintergrund ist der hohe Wasserdurchsatz im Bodensee, der die Schadstoffe schnell aus dem See herauspült. Das ist bei vielen anderen Binnenseen nicht der Fall. Im Prinzip ist der Bodensee nur

eine „Verbreiterung des Rheins mit weiteren Zuflüssen“. Wie in Abbildung 3.6. auch noch zu erkennen ist, sind 30 Jahre nach Einführung der ersten Abgasvorschriften immer noch mehr als 10.000 Schiffe im Einsatz, die keinerlei Abgasvorschriften einhalten müssen. Die Motoren- und Abgastechnologie stammt damit aus den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts. Die aktuellen Regelungen der BSO erlauben ein sehr weitgehendes Reparieren der alten Motoren. Damit müssen weiterhin keine oder sehr alte Emissionsvorschriften eingehalten werden. In Verbindung mit der hohen Lebensdauer der Schiffe bedeutet das, dass die Bestandsschiffe noch sehr lange den Weg hin zu einer klima- und umweltfreundlichen Schifffahrt behindern werden. Eine Umrüstung der Schiffe auf moderne, klimafreundliche und emissionsarme Antriebe ist in vielen Fällen technisch machbar.

**Für die Binnenschifffahrt gibt es heute keine Einschränkungen zur Emission von Klimagasen.**

**Mehr als 90 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bodensee-Schifffahrt stammen von den Kategorien Motorsportboote (>37 kW), Fähren und Fahrgastschiffe**

## 4. Transformation Kraftstoffe, Infrastruktur und Antriebstechnologie

### 4.1 Energie- und Kraftstoffversorgung heute und morgen

Die heutigen Schiffsantriebe und deren Kraftstoffversorgung basieren fast ausschließlich auf fossilem Diesel und Benzin. Die Kraftstoffe bzw. das Erdöl werden fast vollständig und kontinuierlich importiert. Nur sehr geringe Mengen an Bio-Diesel (meist 7 Prozent) oder Bio-Ethanol werden den Kraftstoffen beigemischt. Die flüssigen Kraftstoffe lassen sich sehr einfach speichern und können bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. An dieser Stelle soll auch betont werden, dass unsere heutige Energieversorgung insgesamt (Kraftstoffe, Strom, Wärme) zu einem sehr hohen Anteil auf fossilen Energieträgern beruht. In Deutschland sind dies ca. 80 Prozent des Primärenergieverbrauchs (Abbildung 4.1). Diese Betrachtung ist für die Transformation des Energiesystems hin zur Klimaneutralität entscheidend. Den hohen Anteil an fossilen Kraftstoffen durch klimaneutrale Kraftstoffe zu ersetzen, ist eine enorme Herausforderung und bedarf einer langfristig orientierten Strategie.

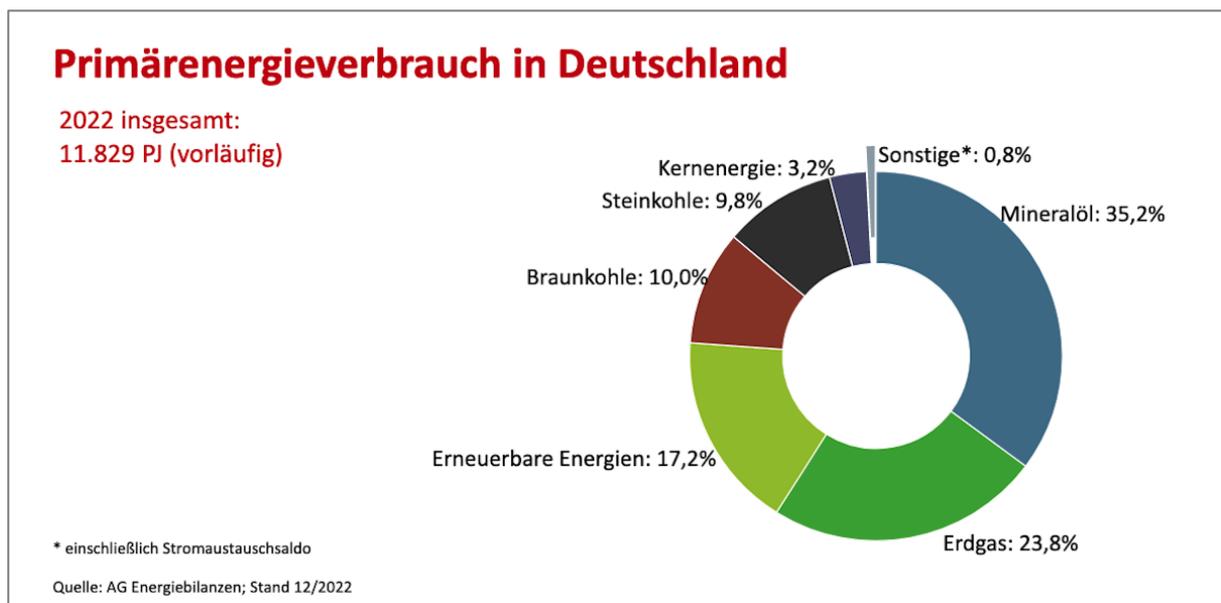


Abbildung 4.1: Zusammensetzung des Primärenergieverbrauches in Deutschland im Jahr 2022 (5)

In der Schweiz liegt der Anteil der fossilen Energieträger beim Bruttoverbrauch bei etwa 50 Prozent. Wasserkraft, Kernenergie und Holz haben bei der Primärenergieversorgung einen relativ hohen Anteil (Abbildung 4.2.). Auf dem Weg zur Klimaneutralität muss die Schweiz den Anteil an fluktuierender Sonnen- und Windenergie deutlich ausbauen sowie den Import von CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern (Wasserstoff, E-Fuels) vorantreiben.

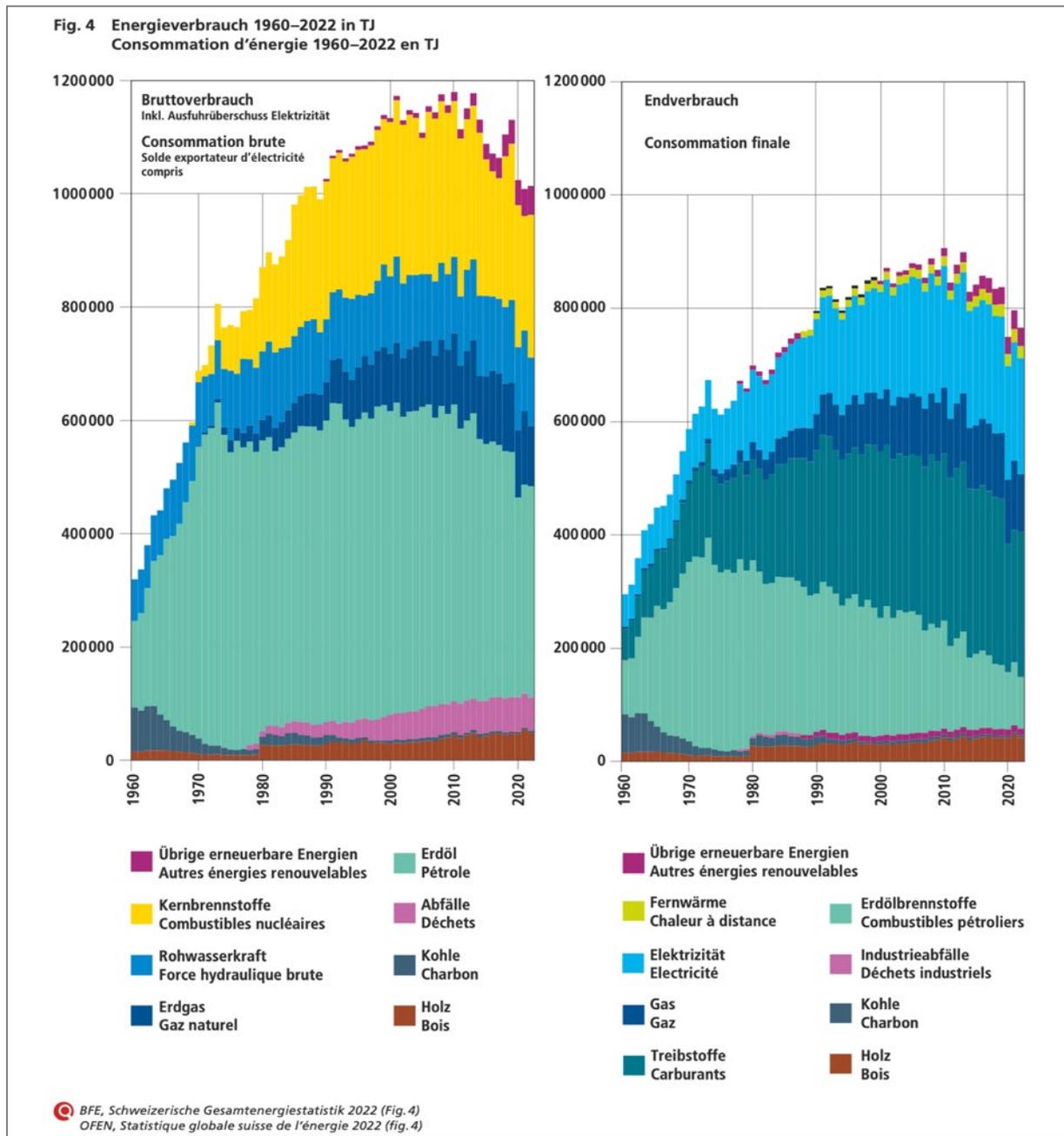


Abbildung 4.2: Brutto- und Endverbrauch der Energieversorgung der Schweiz im Jahr 2022 (6)

In Österreich basierte die Energieversorgung im Jahr 2022 zu 64 Prozent auf fossilen Energieträgern. In der gesamten EU sind es 69 Prozent (Abbildung 4.3). Auf dem Weg zur Klimaneutralität muss Österreich wie die gesamte EU den Anteil an fluktuierender Sonnen- und Windenergie inklusive deren Speicherung deutlich ausbauen sowie den Import von CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern (Wasserstoff, E-Fuels) vorantreiben.

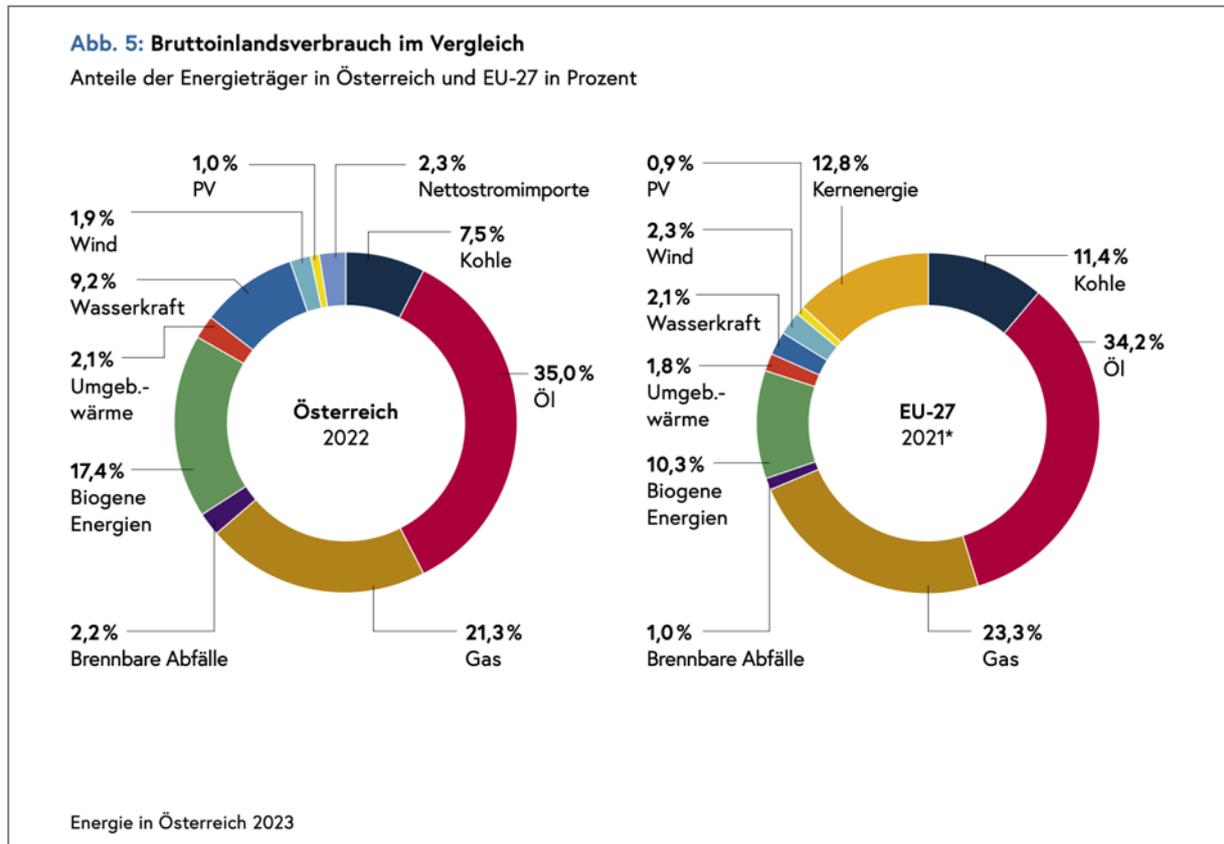


Abbildung 4.3: Bruttoinlandsverbrauch nach Anteilen der Energieträger in Österreich und in der EU-27 im Jahr 2022(7)

Diese Vorbemerkungen zur heutigen Energieversorgung sind wichtig, um zu verstehen, dass es bei der Transformation der Energieversorgung hin zur Klimaneutralität eines langfristigen Ansatzes mit einer Mischung aus neuen, grünen Energietechnologien und Einsparmaßnahmen bzw. Effizienzsteigerungen bedarf. Dies gilt nicht nur für die Schifffahrt, sondern für alle Anwendungen im Verkehrssektor wie auch der Strom- und der Wärmebereitstellung. Der Umbau des Energiesystems auf klimaneutrale Energieträger und Technologien ist nicht kurzfristig machbar. Es bedarf einer langfristig angelegten Strategie, um die Versorgung mit klimaneutraler Energie inklusive der Speichertechnologien aufzubauen und die dazugehörigen Technologien zu industrialisieren.

Im Folgenden werden die neuen Energietechnologien ganzheitlich unter dem Aspekt „well to wheel“ (vom Bohrloch bis zum Rad), also von der Erzeugung (well to tank; vom Bohrloch zum Tank) des Energieträgers (Strom, Wasserstoff, E-Fuel) bis zur Umsetzung in einem Schiffs-Antrieb (tank to wheel; vom Tank zum Rad bzw. der Schraube) betrachtet. In den aktuellen Diskussionen zum Straßenverkehr werden leider immer wieder Emissionen und Wirkungsgrade nur des Fahrzeugs

(tank to wheel) mit denen der Herstellung des Energieträgers (well to tank) regelmäßig miteinander vermischt und führen zu falschen Schlussfolgerungen. In der Gesetzgebung für den Straßenverkehr ist weltweit bislang nur die Emission am Fahrzeug geregelt wie z.B. der EU-Flottengrenzwert für PKW von 95 g CO<sub>2</sub>/km. So werden batterie-elektrische Fahrzeuge mit Null CO<sub>2</sub>-Emissionen definiert, obwohl diese heute in vielen Ländern wie auch in Deutschland zu einem erheblichen Anteil mit fossil erzeugtem Strom geladen werden.

Die CO<sub>2</sub>-Intensität des deutschen Stroms lag im Jahresdurchschnitt 2022 bei 434 g CO<sub>2</sub>/ kWh (8). Beruflich genutzte Fahrzeuge wie Busse oder Geschäftsfahrzeuge, aber auch Fahrgastschiffe können in der Regel nur nachts (kein Strom aus Photovoltaik) und damit mit einer noch schlechteren CO<sub>2</sub>-Bilanz geladen werden, wie man das auf Electricity Maps länderspezifisch verfolgen kann (9). Damit trägt der zügige Ausbau der batterie-elektrischen Antriebe aktuell in Deutschland (und Ländern mit einer ähnlichen Stromversorgung) nur begrenzt zur Reduktion von Klimagasen bei. Erst mit einer Stromversorgung, die rund um die Uhr und ganzjährig einen hohen Anteil an CO<sub>2</sub>-freiem Strom ermöglicht, wird die CO<sub>2</sub>-Bilanz gut. Deutlich besser ist die Situation in der Schweiz und in Vorarlberg, wo die Stromversorgung weitestgehend CO<sub>2</sub>-frei ist. Allerdings muss auch in diesen Ländern beachtet werden, dass mit einer zunehmenden Elektrifizierung des gesamten Verkehrs der Bedarf an CO<sub>2</sub>-freiem Strom deutlich zunehmen wird und temporär (z.B. niedriger Wasserstand in den Flüssen) zu Versorgungsengpässen führen kann.

Im Diskurs über die Kraftstoffversorgung der Zukunft dominiert die Annahme, dass batterie-elektrische Antriebe einen erheblichen Vorteil (in der Wirkungsgrad- oder Energiebetrachtung) im Vergleich zu Wasserstoff oder E-Fuels haben. Diese Annahme ist sehr irreführend. Sie geht davon aus, dass beim Laden der Batterie gleichzeitig ausreichend CO<sub>2</sub>-freier Strom zur Verfügung steht und der auch nicht gleichzeitig von anderen Verbrauchern genutzt werden will. Muss der Strom über Gasturbinen erzeugt werden, dann reduziert sich der Wirkungsgrad dramatisch und die Kosten für die Stromerzeugung steigen deutlich an. Länder wie die Schweiz, Vorarlberg oder auch Schweden und Norwegen, die sehr viel Strom aus Wasserkraft bedarfsgerecht (aus Speicherseen) zur Verfügung stellen können, haben diese Probleme nicht. Alle anderen Länder (ohne Wasserkraft aus Speicherseen) müssen auch berücksichtigen, dass Strom aus Sonnenenergie nur zeitlich begrenzt und heute auch noch kaum in ausreichender Menge zur Verfügung steht (siehe Abbildung 4.11). Laut Deutschem Wetterdienst liegt die Sonnenscheindauer in Deutschland im Mittel über die letzten 10 Jahre bei etwa 1.734 Stunden (10). Das sind rund 20 Prozent der Zeit eines Jahres (8.760 Stunden). Betrachtet man nur die Wintermonate von November bis Januar, dann scheint nur zu etwa 5 Prozent der Zeit die Sonne. Andererseits wird mit dem sehr schnellen Ausbau der Stromerzeugung aus Photovoltaik künftig an sonnigen Tagen sehr viel mehr Strom zur Verfügung

stehen als gebraucht wird. Nur mit einem massiven Ausbau der Speichertechnologien (Batterien und Wasserstoff) kann dieser Überschuss aufgefangen und später genutzt werden. Nur Länder mit vielen Speicherseen und Pumpspeicherkraftwerken (wie Vorarlberg) können dieses Dilemma schon heute lösen.

Bei der Versorgung mit Strom aus Windkraftanlagen hängt die Verfügbarkeit sehr stark von den regionalen Wetterbedingungen ab. Während der typischen Hochdruckwetterlagen, die sich oft über Wochen stabil über ganz Mitteleuropa halten, steht kaum Strom aus Windenergie zur Verfügung. Bei kräftigen Westwind-Wetterlagen gibt es bereits heute in den Küstenregionen zunehmend mehr Windstrom als regional nachgefragt wird. Im Jahr 2022 waren das in Deutschland 8 TWh Strom, die nicht genutzt werden konnten. In Folge wird aktuell gerade in den Küstenländern die Erzeugung von Wasserstoff aus Windenergie massiv vorangetrieben. Der lokal erzeugte Wasserstoff wird dann sehr effizient über das vorhandene Gasleitungsnetz zu den Verbrauchern transportiert, zwischengespeichert und bei Bedarf zur Erzeugung von Strom und Wärme oder als Kraftstoff genutzt

Woher kommt dann der Strom, wenn weder die Sonne scheint noch der Wind weht? Der Strom muss über flexible Gaskraftwerke bereitgestellt werden. Heute stehen in Deutschland etwa 30 GW dieser mit Erdgas betriebenen Kraftwerke zur Verfügung. Aus Abbildung 4.11 wird ersichtlich, dass auch in den windarmen Sommernächten diese Erzeugungskapazitäten benötigt werden. In den Wintermonaten (Abbildung 4.12) erhöht sich der Strombedarf aus den Gaskraftwerken auf mehr als 50 GW – mit zunehmender Zahl an E-Fahrzeugen und Wärmepumpen wird dieser noch deutlich weiter steigen. Aufgrund des geringen Wirkungsgrades der Gasturbinen von etwa 40 Prozent liegt die CO<sub>2</sub>-Intensität des erzeugten Stromes heute bei über 600 g CO<sub>2</sub>/kWh. Wird der Strom zum Laden einer Batterie genutzt, dann reduziert sich sowohl der Gesamtwirkungsgrad eines batterieelektrischen Antriebes sehr deutlich als auch dessen CO<sub>2</sub>-Bilanz, die dann im Bereich eines modernen Diesel- oder Hybridantriebs liegt. Der geringe Wirkungsgrad der Gasturbinen hat auch hohe Kosten für den erzeugten Strom zur Folge.

Erst wenn diese Gaskraftwerke mit grünem Wasserstoff betrieben werden, verbessert sich die Klimawirkung von Elektrofahrzeugen, deren Batterien im deutschen Stromnetz geladen werden. Bis ausreichend grüner Wasserstoff für die Gasturbinen zur Verfügung steht, der zu einem wesentlichen Anteil importiert werden soll (siehe Abbildung 4.4), werden noch 5 bis 10 Jahre vergehen.

Wird der CO<sub>2</sub>-freie Strom in sehr sonnen- oder windreichen Regionen dieser Erde produziert, kann mit der gleichen Technologie (Photovoltaik oder Windkraftanlage) zwei- bis dreimal so viel Strom

erzeugt werden als beispielsweise in der Bodenseeregion. Daraus resultieren sehr geringe Stromkosten, die teilweise heute schon unter 1 ct/kWh liegen. Damit lassen sich künftig Wasserstoff und E-Fuels zu wettbewerbsfähigen Preisen erzeugen und importieren, analog zu unserer heutigen, fossilen Energieversorgung. Bei der Stromerzeugung im geographischen Bereich des sehr gut ausgebauten europäischen Erdgasnetzes ist der Transport der Energie aus diesen sonnen- und windreichen Regionen in Form von Wasserstoff eine attraktive Lösung. Diese Aktivitäten haben eine starke Dynamik entwickelt, wie auf der Seite des European Hydrogen Backbone zu lesen ist (11). Die für die Bodenseeregion relevanten Aktivitäten sind in der Grafik in Abbildung 4.4 dargestellt.

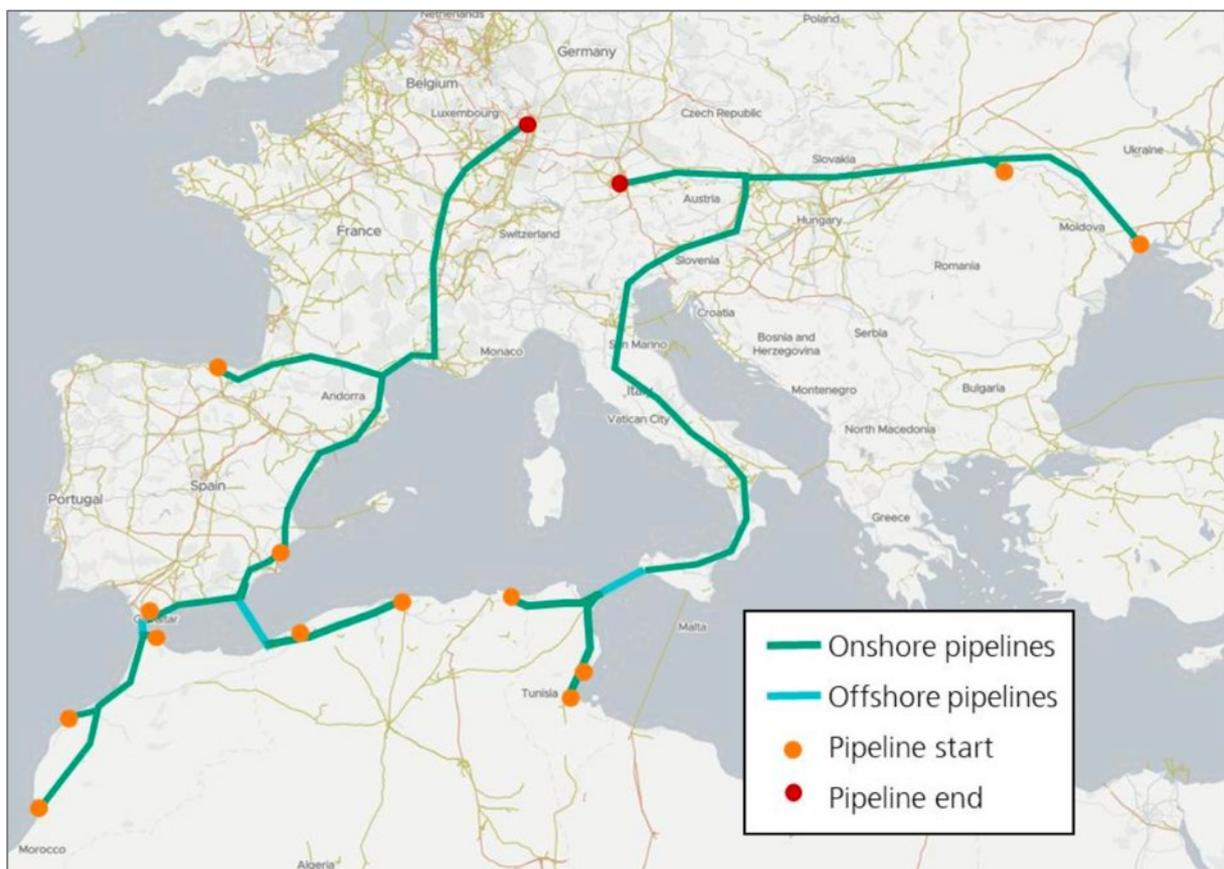


Abbildung 4.4: Geplante Wasserstoffversorgung über Pipelines aus dem Mittelmeerraum (14)

Aus Überseeregionen erfolgt der Energietransport idealerweise über flüssige, CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe (E-Fuel), die sehr effizient und kostengünstig über die etablierten Transportwege wie Tanker, Eisenbahn und LKW direkt zur Tankstelle transportiert und bedarfsgerecht bereitgestellt werden können. Dies ist auch der Traum aller heutigen Nutzer und Hersteller von Verbrennungsmotoren: Ein klimaneutraler, flüssiger Kraftstoff, der die heutigen fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel

einfach ersetzt. Das gerne vorgebrachte Argument, der sehr begrenzten Verfügbarkeit von E-Fuels ist grundsätzlich falsch: Die weltweit verfügbare Sonnenenergie übersteigt den globalen Energiebedarf um ein Vielfaches. Die für das Ernten der Sonnenenergie und zur Herstellung von E-Fuels notwendigen Flächen in den Wüstenregionen sind überschaubar.

Bei der Analyse der flüssigen, CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffe sollen zwei Kategorien betrachtet werden: Kraftstoffe, die aus Biomasse gewonnen (Bio-Fuels) und solche, die synthetisch aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff erzeugt werden - die eigentlichen E-Fuels.

Der derzeit am stärksten nachgefragte erneuerbare Kraftstoff ist Methanol, und zwar für die internationale Seeschifffahrt. Firmen wie Maersk oder COSCO rüsten derzeit viele Schiffe für den Betrieb mit klimaneutralem Methanol aus. Bemerkenswert ist die dabei verfolgte, langfristige Strategie: Durch den Einsatz sogenannter Dual-Fuel-Motoren, die sowohl mit Diesel als auch mit Methanol betrieben werden können, lässt sich der Aufbau der neuen Kraftstoff-Infrastruktur von der Entwicklung der Antriebstechnologie entkoppeln. Beides zu synchronisieren erschwert die Markteinführung erheblich und verunsichert Investoren. Bei Methanol besteht auch die Möglichkeit mit „grauem“, aus fossilen Quellen erzeugtem Methanol zu beginnen und dann sukzessive auf „grünes“ Methanol umzusteigen. Diese Strategie verfolgt China. Methanol ist ein weltweit in riesigen Mengen genutzter Chemie-Rohstoff und Additiv für Benzin-Kraftstoff (etwa 100 Millionen Tonnen pro Jahr). Die Produktion erfolgt an 90 Standorten weltweit und ist ein wichtiger Hinweis auf den Vorteil einer dezentralen Erzeugung auch von E-Methanol, um geopolitischen Abhängigkeiten zu vermeiden. Die Studie „Renewable Methanol“ der International Renewable Energy Association (IRENA) und dem Methanol Institute gibt einen guten Überblick über das Thema E-Methanol (12). Hier ist auch die Aussage zur sehr geringen Umweltgefährdung von Methanol im Vergleich zu Benzin und Diesel für die Bodensee-Region ein entscheidender Faktor (siehe Abbildung 4.18). Im Vergleich zu E-Benzin oder E-Diesel ist E-Methanol wesentlich einfacher (geringerer Investitionsaufwand) und in dezentralen Anlagen herstellbar. Damit ist mit einer schnelleren Verfügbarkeit zu rechnen.

Methanol (CH<sub>3</sub>OH) wird über eine katalytische Reaktion von CO<sub>2</sub> mit H<sub>2</sub> hergestellt. (siehe Abbildung 4.5). Der Wasserstoff wird dabei über die Elektrolyse von Wasser mit klimaneutralem Strom erzeugt. Das CO<sub>2</sub> stammt aus der Atmosphäre (Direct Air Capture), ist biogenen Ursprungs (Verarbeitung von Reststoffen und Abfällen) oder aus Kraftwerken und Industrieprozessen, wie die Zement- oder Stahlerzeugung. Fossil, aus Erdgas erzeugtes Methanol wird dem Benzin schon heute in kleinen Mengen beigemischt (ca. 3 Prozent). Es gibt aber eine ganze Reihe von Motoren, die mit reinem Methanol betrieben werden können (siehe unten).

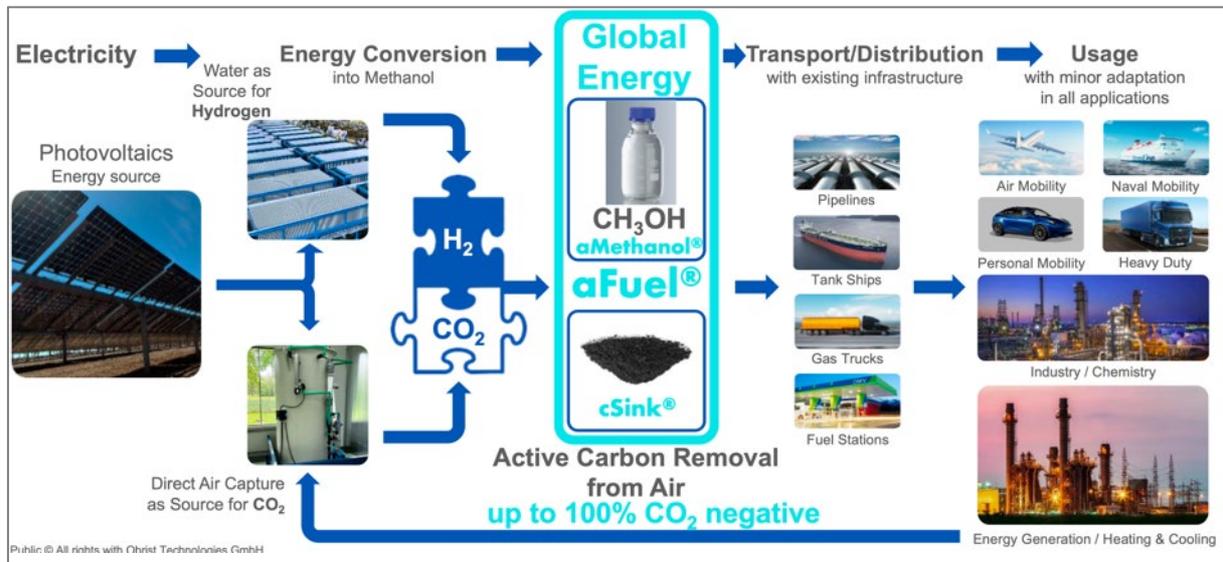


Abbildung 4.5: Prinzip der Herstellung von synthetischem Methanol und dessen Verwendung als Energieträger und Chemie-Rohstoff. Bei aFuel® wird ein Teil des CO<sub>2</sub> als Kohlenstoff abgeschieden (cSink). Beim E-Methanol fällt dieser Schritt weg (13)

In einem parallelen Prozess zur Methanol-Erzeugung kann man über die Reaktion von CO<sub>2</sub> mit H<sub>2</sub> auch festen Kohlenstoff (C) erzeugen (Abbildung 4.5). Der feste Kohlenstoff kann dann beispielsweise landwirtschaftlichen Böden zur Ertragsverbesserung beigesetzt und damit dauerhaft dem Kohlenstoff-Kreislauf der Biosphäre und Atmosphäre entzogen werden. Dies ist ein einfacheres Verfahren als die Endlagerung von CO<sub>2</sub> in ehemaligen Öl- und Gaslagerstätten (CCS = Carbon Capture and Sequestration).

Aus der Kombination der beiden zuvor genannten Prozesse entsteht dann ein Kraftstoff, der nicht nur klimaneutral ist, sondern bei der Herstellung der Umwelt mehr CO<sub>2</sub> entzieht als bei dessen Verbrennung wieder frei wird. Solche CO<sub>2</sub>-negativen Kraftstoffe – aktuell häufig Biomasse-basiert (42) – gewinnen immer mehr an Bedeutung, da die klimaneutralen Technologien nicht mehr ausreichen, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf ein für unser Klima verträgliches Niveau zu reduzieren. Aufgrund der aktuell immer noch weiterwachsenden CO<sub>2</sub>-Emissionen ist das für das 1,5°C-Ziel notwendige Niveau an Klimagasen schon heute erreicht (Abbildung 2.1). Dies zeigt sich auch in der starken Zunahme extremer Wetterereignisse. Wie in Abbildung 4.6. dargestellt, bedarf es neuer Technologien, um auf das Niveau von 1990 zurückzukommen. Die Fa. Obrist bezeichnet das von ihr entwickelte Verfahren zur Herstellung von aFuel® auch als „Modern Forest“: Ähnlich dem Wachstum von Bäumen im Wald entsteht aus Sonnenlicht, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und Wasser fester Kohlenstoff und Sauerstoff – allerdings auf einer Fläche, die um den

Faktor 50 kleiner ist als die Fläche, die die Natur für die Erzeugung von Biomasse über die Photosynthese mit vergleichbarer Klimawirkung benötigt.

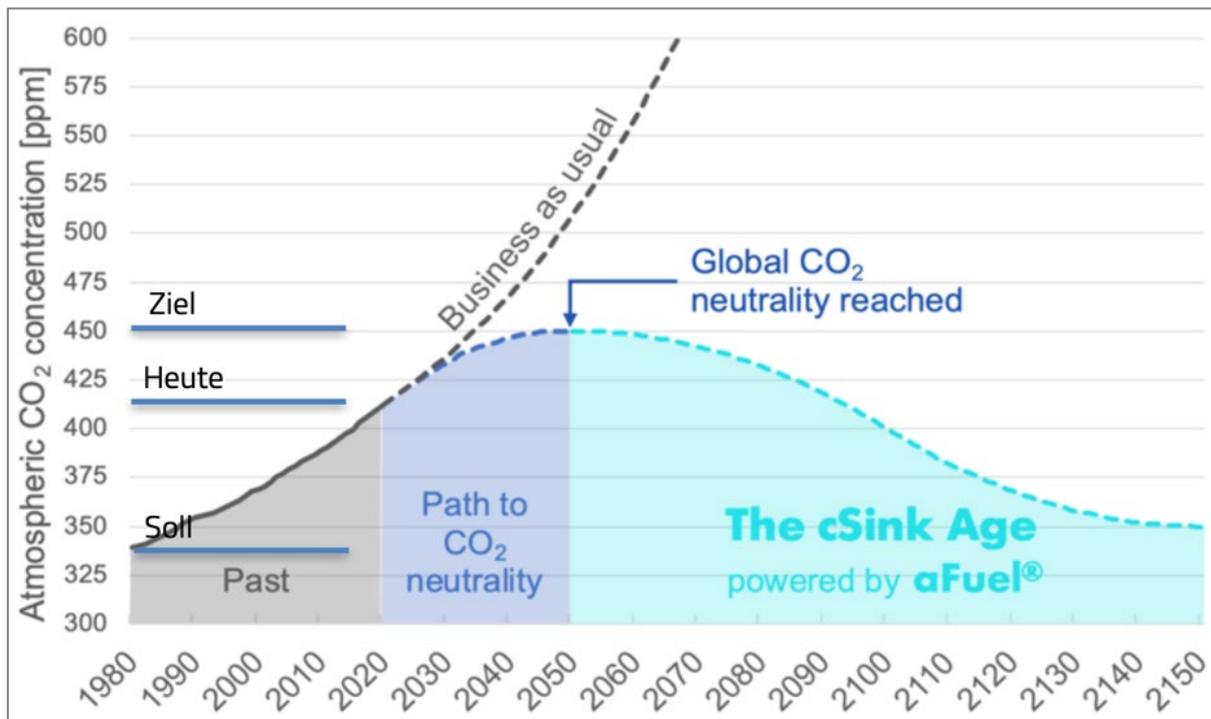


Abbildung 4.6: Die Bedeutung von CO<sub>2</sub>-negativen Kraftstoffen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (13)

Die Erzeugung der klimaneutralen Kraftstoffe E-Benzin, E-Kerosin oder E-Diesel erfolgt zunehmend aus Methanol über den Methanol-to-Olefin-Technologie (MTO-Prozess). Die traditionelle Fischer-Tropsch-Synthese basiert auf der Umsetzung von Synthesegas (CO + H<sub>2</sub>) zu flüssigen Kraftstoffen. Die Mineralölindustrie hat in Bereich der E-Fuels bisher nur geringe Aktivitäten entfaltet. Das prominenteste Beispiel ist das laufende Projekt der Firma HIF mit Unterstützung der Porsche SE und der Siemens Energy AG. In dem sehr windreichen Patagonien wird aus Windstrom Wasserstoff erzeugt und mit CO<sub>2</sub> zu Methanol umgewandelt. Das Methanol wird nach Europa verschifft. In einer Raffinerie entsteht daraus E-Benzin. Von Seiten der Mineralöl-Industrie zeigt Saudi Aramco erstmals deutlich zunehmende Aktivitäten zur Herstellung von E-Benzin und E-Diesel, unter anderem über eine Partnerschaft mit dem Automobilkonzern Stellantis (15). Eine Studie des europäischen Raffinerie Verbandes CONCAWE gemeinsam mit Saudi Aramco zeigt, dass E-Fuels grundsätzlich zu wettbewerbsfähigen Bedingungen hergestellt werden können. Die Grafik in Abbildung 4.7 zeigt die zu erwartenden Kosten bei einem Strompreis von 2 ct/kWh. Inzwischen sind Strompreise von unter 1 ct/kWh in sonnenreichen Regionen möglich (16). Damit

würden die Preise für E-Fuels mit denen von fossilem Diesel (inklusive CO<sub>2</sub>-Steuer) gleichziehen. Auch die bereits zitierte Studie des Fraunhofer ISE (14) prognostiziert wettbewerbsfähige Preise für E-Fuels, insbesondere unter Berücksichtigung der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Preise, die fossile Kraftstoffe zunehmend verteuern werden.

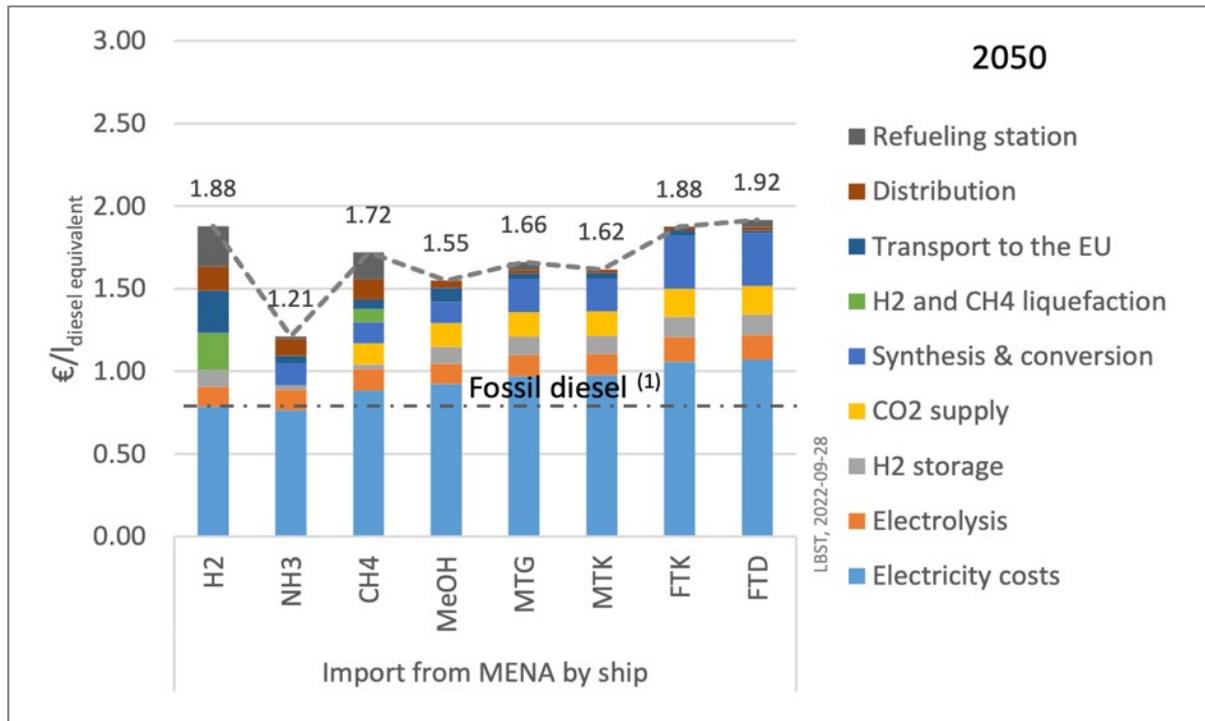


Abbildung 4.7: Kosten für verschiedene H<sub>2</sub>-Derivate und E-Fuels, produziert in MENA und nach Europa transportiert

Für den Aufbau einer relevanten industriellen Produktion von E-Fuels muss mit einem Zeitraum von 10 Jahren gerechnet werden. Um die notwendigen Investitionen im dreistelligen Milliardenbereich zu ermöglichen, sind entsprechende, stabile politische Leitplanken entscheidend. Aktuell werden von der Europäischen Politik (Renewable Energy Directive) nur E-Fuels für den Luftverkehr (SAF = Sustainable Aviation Fuels) und die internationale Schifffahrt unterstützt (31).

Biogene Kraftstoffe (Bio-Fuels) sind seit Jahrzehnten ein öffentlich viel und kontrovers diskutiertes Thema. Biodiesel, der aus Pflanzenölen wie Raps durch eine Reaktion mit Methanol oder Ethanol hergestellt wird, ist der klassische Vertreter dieser Kategorie. Dieser Bio-Kraftstoff wird häufig zu etwa 7 Prozent dem fossilen Diesel beigemischt und erfüllt die Anforderungen der Motorenhersteller (18). Für reinen Biodiesel (FAME) sind aufgrund der unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften im Vergleich zum fossilen Diesel nur wenige Motoren zugelassen. Nach der großen Euphorie der 2000er Jahre geriet der Kraftstoff politisch

unter Druck, da immer häufiger Palmöl für die Biodieselherstellung verwendet wurde. Für die Palmölplantagen wurde zunehmend Regenwald gerodet, der für das Weltklima von entscheidender Bedeutung ist. So wurde die von vielen angenommene Klimafreundlichkeit in das Gegenteil verkehrt. Ganz generell haben Biokraftstoffe den Nachteil des sehr hohen Land- und Wasserverbrauchs sowie des Einsatzes von Kunstdüngern und Pestiziden.

Aktuell stehen HVO-Kraftstoffe (Hydrogenated Vegetable Oil) als vermeintlich klimafreundlicher Ersatz für Diesel hoch im Kurs. Dabei geht es um gebrauchtes Pflanzenöl (meist als Frittenfett bezeichnet), das durch eine katalytische Behandlung mit (fossilem) Wasserstoff so verändert wird, dass es inzwischen von fast allen Motorenherstellern als Dieselerersatz zugelassen ist (19). Auf den ersten Blick ist das eine sehr attraktive Lösung, die aber einer kritischen Überprüfung nicht standhält. Die erste Frage lautet: Was wurde bisher mit gebrauchtem Pflanzenöl gemacht? Das gibt es schon seit Jahrzehnten und wurde bisher zur Herstellung von Biodiesel (FAME) oder als Tierfutter wiederaufbereitet und trug damit auch positiv zur Klimabilanz bei. Die Aufbereitung zu HVO und der Einsatz als Dieselerersatz leisten daher allenfalls einen kleinen Beitrag zum Klimaschutz, insbesondere solange für die Herstellung fossiler Wasserstoff verwendet wird und damit die direkte CO<sub>2</sub>-Minderung (über die Herstellkette betrachtet) nur etwa 50 Prozent beträgt (41). Primär ist der aktuelle Trend zum vermehrten Einsatz von HVO von den hohen Prämien zur Erfüllung der Treibhausgas-Quoten geprägt. Aufgrund der finanziellen Attraktivität ist auch die Gefahr groß, dass frisches Palmöl beigemischt wird. Wie bereits erwähnt, wird die Klimabilanz in diesem Fall durch die Rodung von Regenwäldern für Palmöl-Plantagen extrem negativ. Das andere Thema ist die sehr begrenzte Verfügbarkeit von HVO-Kraftstoffen (41). Heute werden weltweit pro Tag 27 Millionen Barrel (1 Barrel sind 159 l) an Diesel-Kraftstoff verbraucht (20). Die produzierte Menge an HVO-Kraftstoff liegt weltweit bei 0,15 Millionen Barrel pro Tag. Das sind 0,5 Prozent des Verbrauches an fossilem Diesel. Der Ausbau der Produktionskapazitäten ist derzeit zwar hoch, aber aufgrund der Verfügbarkeit von gebrauchten Speiseölen insgesamt sehr begrenzt (41). Die Menge an weltweit produziertem Biodiesel liegt bei 0,7 Millionen Barrel pro Tag. Da Biodiesel seit mehr als 20 Jahren in großen Mengen produziert wird, ist das ein guter Hinweis auf die begrenzte Verfügbarkeit von Kraftstoffen auf Pflanzenbasis. Die gerne zitierte Verwendung von biogenen Abfällen (Gülle, Klärschlamm) zur HVO-Erzeugung hat nichts mit „Vegetable Oil“ zu tun und ist technologisch sehr anspruchsvoll.

Analoges gilt auch für Ethanol (aus der Vergärung von Getreide), das heute dem Benzin beigemischt und in Ländern wie Brasilien auch als reiner Kraftstoff eingesetzt wird. Auch für Biogas (Methan), das für Antriebe genutzt werden kann, ist die Faktenlage ernüchternd: In Deutschland stehen heute 10 TWh an Biogas zur Verfügung. Das entspricht etwa 1 Prozent des gesamten jährlichen

Verbrauches an fossilem Erdgas (ca. 800 TWh). Diese geringen Mengen an Biogas kann man dann für Heizzwecke, in der Industrie oder für Antriebe (z.B. in Form von Bio LNG) nutzen.

Die Klimawirkung bleibt auf Grund der geringen Mengen sehr begrenzt und kaum ausbaubar. Die regionale Verwertung von Reststoffen zur Erzeugung von Biogas kann dabei durchaus eine sinnvolle Option für Nischenmärkte sein.

Warum sind pflanzenbasierte Kraftstoffe nur begrenzt verfügbar? Der Grund hierfür liegt im sehr geringen Wirkungsgrad der Photosynthese. Die Umwandlung von Sonnenlicht in Biomasse (z.B. Mais) liegt deutlich unter einem Prozent.

Im Gegensatz dazu liegt der Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Photovoltaik inzwischen bei deutlich über 20 Prozent. Damit lässt sich eine sehr interessante Analyse machen: Würde man die 2,3 Millionen Hektar landwirtschaftlicher Fläche, die heute in Deutschland für den Anbau von Energiepflanzen (primär Mais für die Biogasproduktion) genutzt wird, für Photovoltaik-Anlagen nutzen, könnte man damit jährlich 1.200 TWh Strom ernten. Das ist die doppelte Menge an Strom, die heute in Deutschland insgesamt verbraucht wird. Nachdem diese Strommengen nicht zeitgleich zur Erzeugung genutzt werden können, bietet sich die Umwandlung in Wasserstoff an. Die daraus resultierende Menge von etwa 800 TWh an Wasserstoff entspricht der Menge an Erdgas, die heute nach Deutschland importiert wird – ein Thema, das bislang noch keinen Einzug in die politischen Diskussionen zur Energiewende gefunden hat. Entscheidend für die Machbarkeit dieser regionalen Energieversorgung ist ein darauf angepasstes Strommarktdesign.

**E-Benzin oder E-Diesel als direkter Ersatz für die heutigen fossilen Kraftstoffe wird in den nächsten 15 Jahren nur begrenzt verfügbar sein.**

**Klimafreundliche, batterie-elektrische Antriebe benötigen grünen Strom, der im deutschen Stromnetz noch für viele Jahre nur zeitlich begrenzt in ausreichender Menge verfügbar sein wird.**

**Für die meisten Anwendungen in der Bodensee-Schifffahrt ist E-Methanol der attraktivste Kraftstoff.**

## 4.2 Batterie-elektrische Antriebe und CO<sub>2</sub>-freier Strom

Die Elektromobilität mit Batterien schreitet weltweit mit hoher Geschwindigkeit voran. Im Jahr 2023 werden voraussichtlich mehr als 26 Millionen PKW mit Elektro-Antrieb verkauft werden. Davon werden knapp 80 Prozent rein batterie-elektrische Antriebe sein und gut 20 Prozent sogenannte Plug-In-Hybride. Damit ist die Industrialisierung von Antrieben und Batterien für PKW bereits weit vorangeschritten. Auch in anderen Segmenten wie LKW, Busse und Bahnen werden zunehmend elektrische Antriebe eingesetzt. Treiber für all diese Märkte sind die weltweit immer strenger werdenden Gesetze zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Neben der lokalen Emissionsfreiheit in Bezug auf CO<sub>2</sub> und Schadstoffe zeichnen sich Elektroantriebe auch durch eine geringe Geräuschentwicklung und wenig Vibrationen aus – ein Komfort, der nicht nur im Freizeit- und Tourismusbereich hoch geschätzt wird. Auch bei Schiffen halten batterie-elektrische Antriebe immer mehr Einzug in den Markt, wobei Skandinavien mit ausreichend grünem Strom eine Vorreiterrolle einnimmt. Einen guten Überblick über die aktuellen Entwicklungen bietet die Seite von [electrive.net](https://www.electrive.net) (17).

Allerdings befindet sich die marine-spezifische Industrialisierung – vor allem im Segment der Sportboote – noch in einem sehr frühen Stadium. Professionelle batterie-elektrische Antriebe erfordern unter anderem eine sehr umfassende Sicherheitsanalyse und Produktqualifikation. Die Folgen eines Batteriebrandes auf einem Schiff sind im Vergleich zu Straßenfahrzeugen deutlich kritischer zu bewerten.



Abbildung 4.8: Solarschiff MS Mainau, mit 2 x 75kW Elektromotoren und bis zu 300 Passagieren (21)



Abbildung 4.9: Sportboot mit 55 kW E-Antrieb von Delphia (22)

Von Kritikern wird häufig auch die Ökobilanz (auch als Life Cycle Assessment, LCA bezeichnet) der Lithium-Ionen-Batterien hinterfragt. Stark vereinfacht hängt diese primär von den Aktivmaterialien

der Batterie und von deren jährlicher Nutzungsdauer ab. Batterien mit Lithium-Eisenphosphat (LFP) Kathoden haben eine deutlich bessere Ökobilanz als die in der E-Mobilität dominierenden Batterien mit Nickel- und Kobalt-haltigen Kathoden. Inzwischen setzen Tesla wie auch viele Hersteller von stationären Stromspeichern vermehrt LFP ein. Dieses Material ist darüber hinaus sehr viel sicherer als die in heutigen E-Fahrzeugen gängigen Materialien. Bei den Sportbooten ist die heute für den Bodensee typische Nutzungsdauer von 30 Stunden nicht sehr hilfreich für das Erreichen einer guten Ökobilanz. Bei Charter- und Fahrgastschiffen sieht es deutlich besser aus.

In Zusammenhang mit der erst beginnenden Industrialisierung stehen auch die heute noch recht hohen Kosten für Elektroantriebe. Abbildung 4.10 vergleicht dies am Beispiel eines Außenbord-Antriebes mit kleiner Leistung. Bei höheren Leistungen und vor allem größeren Batterien werden die Unterschiede zu den heutigen Verbrennungsmotoren noch deutlich größer. Dies liegt primär daran, dass solche E-Antriebe heute nur in sehr kleinen Stückzahlen (Manufakturen) und damit zu sehr hohen Kosten hergestellt werden. Das ist das berühmte Henne – Ei -Problem, das generell bei der Markteinführung neuer Technologien auftritt: Kleine Stückzahlen bedeuten hohe Kosten und große Stückzahlen geringe Kosten. Bei den inzwischen in großen Stückzahlen produzierten Batteriesystemen für PKW liegen die Kosten bei unter 150 € / kWh. Bei den Batterien für Boote liegen die Preise heute bis zu einem Faktor 10 höher.



Abbildung 4.10: Vergleich von Kosten und Gewicht eines Außenbord-Antriebes mit Benzin-Motor und Elektroantrieb

Gleichzeitig müssen hier auch die Grenzen dieser Technologie erkannt werden: Die Energiedichte von Batterien liegt im Bereich von 100 -200 Wh/kg auf Systemebene und wird nie mit der von Benzin oder Diesel (ca. 12.000 Wh/kg) mithalten können. Daran wird auch der höhere Wirkungsgrad eines E-Motors, der im Vergleich zu einem Antrieb mit einem reinen Verbrennungsmotor etwa um einen Faktor 3 – 5 besser ist, nicht viel ändern. Daraus folgt, dass batterie-elektrische Antriebe für Schiffe mit wenig Energieverbrauch (Verdränger) und moderaten Reichweiten/Betriebszeiten

geeignet sind. Deshalb sind beispielsweise batterie-elektrische Antriebe für Fahrten von Bregenz nach Konstanz aufgrund der großen Strecke nicht geeignet. Zur Verdeutlichung ein einfaches Beispiel: Eine Yacht mit fünf Tonnen Gewicht und einer Batterie mit einer Tonne Gewicht (etwa 150 kWh Energieinhalt) könnte etwa 30 Minuten Gleitfahrt absolvieren, bis die Batterie entladen ist. In den Medien wird gerne von „Wunder-Akkus“ mit herausragenden Eigenschaften berichtet. Diese „Wunder“ sind realistisch betrachtet sehr unwahrscheinlich. Experten sind sich darüber einig, dass neue Technologien Verbesserungen im Bereich von 10 Prozent pro Jahr ermöglichen. Das ändert die zuvor gemachten Aussagen nicht grundsätzlich.

Ein wichtiges Thema ist die notwendige Infrastruktur für das Laden der Batterien. Ein langsames Laden (1 – 3 kW) ist mit einer normalen 220 Volt Infrastruktur, wie sie in vielen Häfen vorhanden ist oder mit überschaubarem Aufwand installiert werden kann, einfach machbar. So kann zum Beispiel ein 20 kWh Akku in 10 Stunden mit 2 kW aufgeladen werden. Hier ist allerdings anzumerken, dass viele Häfen aus Sicherheitsgründen derzeit das Laden von Batterien an Bord nur erlauben, solange die Besatzung an Bord ist. Das schränkt die Attraktivität batterie-elektrischer Antriebe deutlich ein.

Für das Schnellladen mit hohen Strömen mit bis zu 22 kW Wechselstrom oder mit bis zu einigen hundert kW Gleichstrom ist eine teure Ladeinfrastruktur notwendig. Das beinhaltet nicht nur die eigentliche Ladesäule, sondern meist einen Mittelspannungsanschluss im Stromnetz. Im Bereich der Sportboote mit wenigen Ladevorgängen pro Jahr wird ein kommerzieller Betrieb der Ladeinfrastruktur nicht machbar sein: die Preise für den geladenen Strom müssten extrem hoch angesetzt werden, um die Investition zu amortisieren. Hinzu kommt, dass es an Sommerwochenenden schnell zu langen Wartezeiten kommt, da das Schnellladen je nach Akku eine halbe bis eine Stunde pro Boot dauert und damit deutlich mehr Zeit erfordert als das Betanken mit flüssigen Kraftstoffen.

Bei Fahrgastschiffen oder Fähren, die in kurzen Abständen viel Strom tanken, amortisiert sich die Ladeinfrastruktur dagegen schneller. Bei sehr häufigen Ladezyklen mit sehr hohen Strömen wird die Zyklen-Lebensdauer der Batterien ein wichtiges wirtschaftliches Kriterium (39).

Für saisonal oder wenig genutzte Schiffe ist auch die Überwachung des Ladezustandes der Batterie ein Thema, das beachtet werden muss. Wird die Batterie über lange Zeit (Monate) nicht genutzt, kann sie durch die Selbstentladung so beschädigt werden, dass sie nicht mehr eingesetzt werden kann.

Für die Klimaneutralität ist die Frage nach dem Strom zum Laden der Batterien entscheidend. Idealerweise kommt der Strom direkt von einer Photovoltaikanlage – das wäre die effizienteste Lösung. Für große Ladeleistungen wäre der Flächenbedarf für die Solarmodule bereits erheblich, wie folgende grobe Abschätzung zeigt: Um z.B. für eine Fähre 1 MW Ladeleistung bereit zu stellen (damit könnten in 30 Minuten 500 kWh Batteriekapazität nachgeladen werden), bedarf es einer Dachfläche von 8.000 m<sup>2</sup> oder etwa 2 ha Freiflächen-Photovoltaik. Letzteres entspricht der Größe von 3 Fußballfeldern. Das Ganze funktioniert nur dann, wenn gleichzeitig zum Laden auch die Sonne kräftig scheint. Zum Vergleich: das nur langsam und effizient fahrende elektrische Fahrgastschiff MS Insel Mainau hat eine Batteriekapazität von 1.000 kWh.

Strom aus Windenergie ist in der Bodenseeregion vernachlässigbar, Strom aus Wasserkraft ist in Vorarlberg und der Schweiz heute ausreichend verfügbar.

Bei großen Strommengen, die vor allem nachts geladen werden sollen, wird die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-freiem Strom zur Herausforderung im deutschen Stromnetz. Die Problematik soll anhand der Grafik zur Stromerzeugung in Deutschland in einer typischen Sommerwoche (Hochdruckwetterlage mit wenig Wind) aufgezeigt werden (Abbildung 4.11): Tagsüber ist der Anteil an Sonnenstrom schon heute sehr hoch. Zu dieser Zeit sind die Schiffe allerdings auf dem See unterwegs, die Batterien können nicht geladen werden. Abends und nachts steht im deutschen Stromnetz kaum grüner Strom zur Verfügung (brauner Pfeil in Abbildung 4.11). Die Batterien können nur mit Strom aus Kraftwerken geladen werden. Mit fossil erzeugtem Strom tragen batterie-elektrische Antriebe dann kaum zur Reduktion von Klimagasen bei. Erst wenn grüner Wasserstoff (oder Derivate davon) in ausreichender Menge für die Kraftwerke zur Verfügung steht, kann auch zu Zeiten ohne Sonnenschein CO<sub>2</sub>-frei geladen werden. Nach den aktuellen Plänen der Gasnetzbetreiber und der deutschen Bundesregierung ist erst nach 2030 damit zu rechnen, dass ausreichend grüner Wasserstoff zur Erzeugung von klimafreundlichem Strom importiert werden kann.

Im Jahr 2030 wird es nach dem in Deutschland geplanten Ausbau der Photovoltaik-Kapazität auf mehr als 200 GW (heute etwa 70 GW) dagegen an sonnenreichen Tagen einen enormen Überschuss an Strom geben (Abbildung 4.11- blauer Pfeil). Diese riesigen Strommengen müssen für die Nacht gespeichert werden. Neben Batterien wird Wasserstoff eine wichtige Rolle bei der Speicherung überschüssigen Stroms spielen. Der Handlungsbedarf ist hier sehr groß, um die Strompreise aufgrund des Abregelns des überschüssigem Sonnenstroms nicht extrem ansteigen zu lassen.

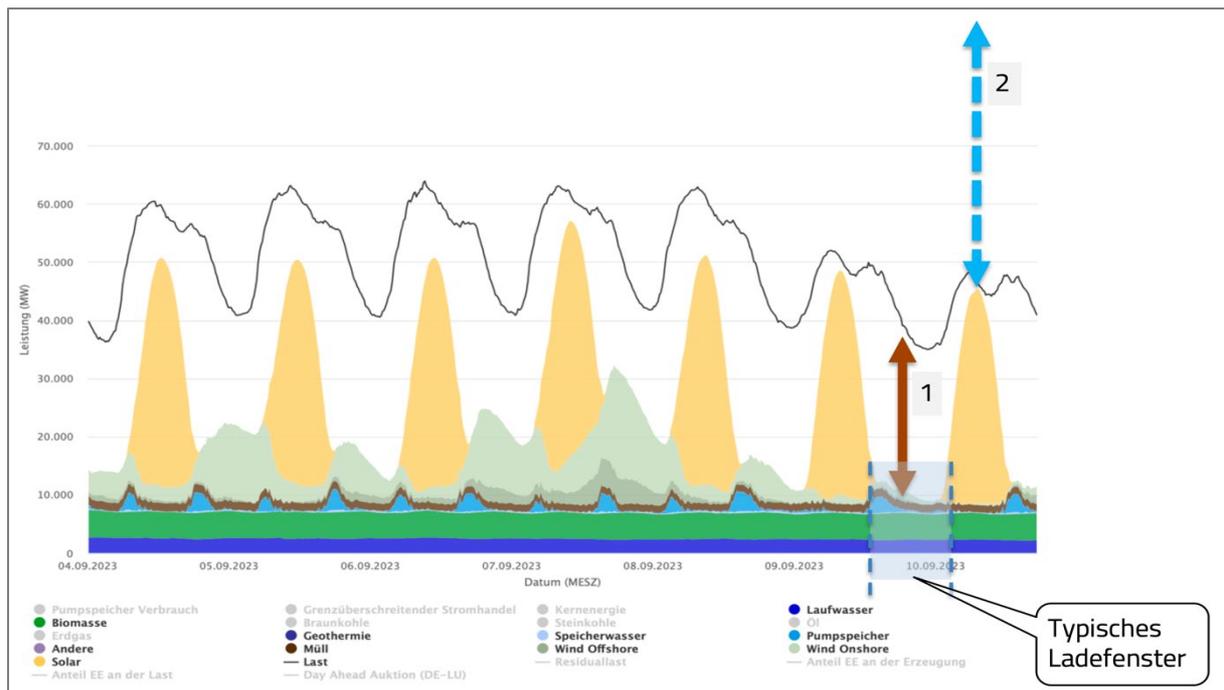


Abbildung 4.11: Stromerzeugung aus CO<sub>2</sub>-freien Quellen (fossile Stromerzeugung ist ausgeblendet) und Verbrauch (schwarze Linie) im deutschen Stromnetz in der Woche vom 4. September 2023; 1: in den Abend- und Nachtstunden kommt der Strom zum größten Teil aus fossilen Kraftwerken; 2: Strom aus Photovoltaik im Jahr 2030 (18)

In den Wintermonaten (nur für Fähren und die Katamarane relevant), wenn die Tage sehr kurz sind und windarme Hochdruckwetterlagen oft wochenlang das Wetter bestimmen (Nebel über ganz Mitteleuropa), wird die Versorgung mit grünem Strom noch viel schwieriger (Abbildung 4.12). Die Stromversorgung muss dann für sehr lange Zeit aus Kraftwerken bereitgestellt werden, die heute noch mit fossilen Energieträgern befeuert werden. In den Wintermonaten ist die Verfügbarkeit von Strom aus Laufwasserkraftwerken aufgrund niedriger Wasserstände zunehmend begrenzt. Das gilt primär für die Schweiz, deren aktuelle Stromversorgung zu 67 Prozent aus erneuerbaren Energien und zu 29 Prozent aus Kernenergie besteht.

Vorarlberg hat mit seiner Wasserkraft aus Speicherseen und Pumpspeicherkraftwerken eine komfortable Situation: Dort können die VKW Illwerke zu jeder Tages- und Jahreszeit CO<sub>2</sub>-freien Strom liefern.

Durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung und der Kernkraft sowie nur begrenzt verfügbarem Erdgas (Geopolitik) wird die Stromversorgung in den Bodenseeanrainerstaaten in den nächsten Jahren generell zu einer Herausforderung.

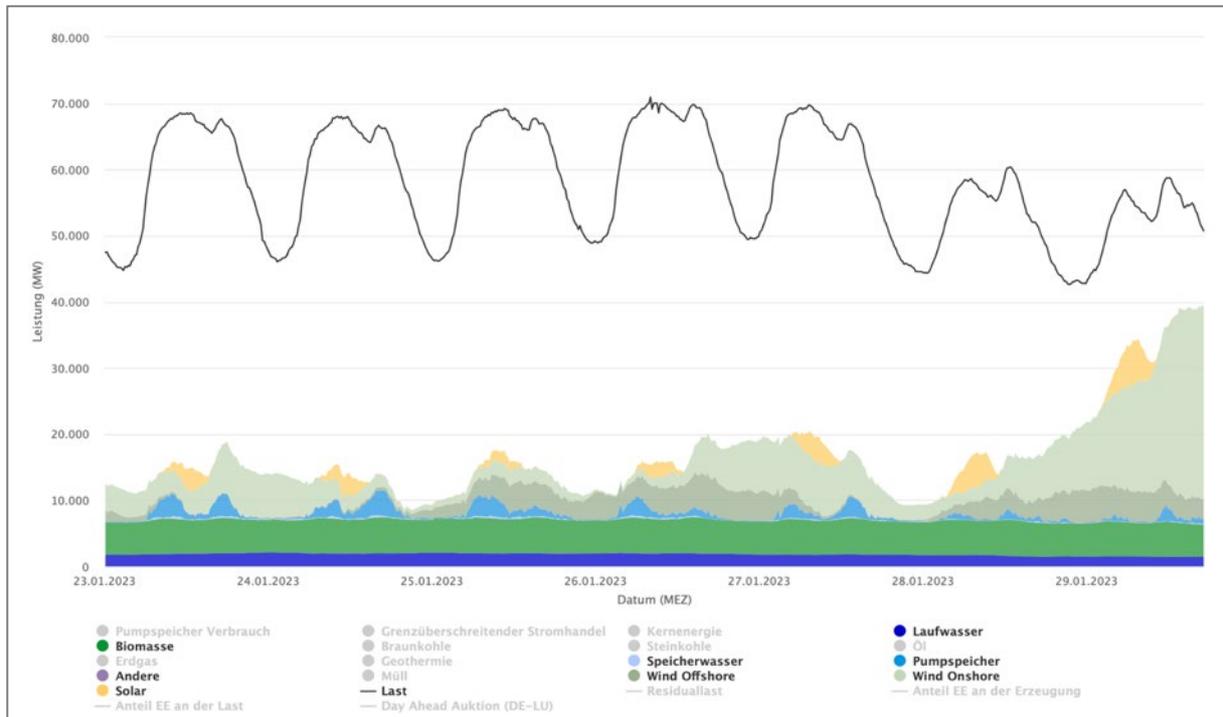


Abbildung 4.12: Stomerzeugung aus CO<sub>2</sub>-freien Quellen (fossile Stomerzeugung ist ausgeblendet) und Verbrauch (schwarze Linie) im deutschen Stromnetz in der Woche vom 23. Januar 2023; die Differenz zwischen Last und klimaneutralem Strom wird über Kohle- und Gaskraftwerke erzeugt

Solarboote ermöglichen das Laden der Batterie während der Fahrt und im Hafen über Photovoltaikmodule, die auf dem Schiff montiert sind. Die Module bieten idealerweise auch eine Verschattung für die Passagiere. Die MS Insel Mainau (Abbildung 4.7) ist dafür ein schönes Beispiel. Nach den ersten Erfahrungen kann mit dem Strom aus den Photovoltaik-Modulen ein Autarkiegrad von bis zu 60 Prozent erreicht werden. Der Durchschnittswert liegt bei etwa 20 Prozent. Das bedeutet, dass 80 Prozent des verbrauchten Stromes nachts und heute noch mit fossilem Strom geladen werden müssen.

### 4.3 Wasserstofftechnologien

Wasserstofftechnologien sind seit einigen Jahren weltweit auf dem Vormarsch. Unter dem Begriff Wasserstofftechnologien subsumiert sich eine Vielzahl von Aktivitäten, von der Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Sonnen- und Windstrom, der Speicherung und des Transports des Energieträgers sowie dessen Umwandlung in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren in Strom oder mechanische Energie. Im Verkehrssektor kommen die Tankstellen zur Betankung der

Fahrzeuge dazu. Organisationen wie das Hydrogen Council (23), IRENA (24) oder die IEA (25) stellen sehr umfassende Berichte zu allen Themen rund um Wasserstoff zur Verfügung.

Wasserstoff wird schon seit mehr als einhundert Jahren industriell erzeugt (primär aus Erdgas) und in vielen Anwendungsbereichen (Raffinerien, Kunstdünger, Chemie) genutzt. Die weltweite Produktionsmenge liegt im Bereich von 120 Millionen Tonnen. Seit Jahrzehnten wird Wasserstoff auch in Pipelines transportiert.

Künftig wird Wasserstoff über die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus Sonnen- und Windenergie CO<sub>2</sub>-frei hergestellt werden. Die Produktion wird in sehr wind- und sonnenreichen Regionen (Nordsee, Spanien, Portugal, Nordafrika) mit Stromkosten bis zu unter 1 Cent/pro kWh erzeugt und zum Großteil über bestehende Gaspipelines transportiert werden. Ab etwa 2030 sollen erste Lieferungen nach Deutschland und bis 2035 in die Bodenseeregion erfolgen (Abbildung 4.4). Aus Übersee ist der Transport in Form von Derivaten wie Ammoniak oder Methanol geplant. Da heute der größte Teil der benötigten Energie in Form von Erdgas oder Erdöl importiert wird, wird in Zukunft auch der Import von CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern eine wichtige Säule unserer Energieversorgung bleiben.

Eine weitere Quelle für Wasserstoff ist die regionale Erzeugung von überschüssigem Strom aus Wind- und zunehmend auch aus Sonnenenergie. Mit dem Ausbau der Sonnen- und Windenergie wird zeitweise deutlich mehr Strom zur Verfügung stehen als direkt verbraucht werden kann. Diesen überschüssigen Strom wird man in großen Mengen in Form von Wasserstoff speichern und für den Verkehr oder die Wärmeversorgung nutzen. Im Jahr 2022 wurden in Deutschland 8 TWh an Strom aus Wind- und Sonnenenergie abgeregelt (nicht genutzt). Wäre dieser Strom in Wasserstoff umgewandelt worden, so hätte er ausgereicht, um 16.000 Stadtbusse ganzjährig zu betreiben. Mit der geplanten Verdoppelung der Produktionskapazitäten bei Wind und der Verdreifachung bei Photovoltaik bis 2030 werden die Überschüsse deutlich zunehmen. Abbildung 4.11 zeigt das am Beispiel der Photovoltaik an sonnenreichen Sommertagen.

Elektroantriebe mit Brennstoffzellen und Wasserstoff spielen im Verkehrssektor künftig eine tragende Rolle. Das betrifft vor allem Busse, LKW und Schienenfahrzeuge. Heute sind weltweit rund 50.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf der Straße, wobei die Schweiz mit den Aktivitäten von H2-Energy zur emissionsfreien Logistik eine Vorreiterrolle einnimmt. Inzwischen haben 47 LKW mehr als 13 Millionen Kilometer Waren emissionsfrei über Schweizer Autobahnen transportiert. Firmen wie Hyundai, Toyota, Bosch, Stellantis, Renault und viele chinesische Firmen haben mit der Entwicklung der Serienproduktion von Brennstoffzellen begonnen. Auch beteiligen sich immer mehr

Firmen am Ausbau der Tankstellen-Infrastruktur für Wasserstoff, wie H2-Energy mit Philipps 66 oder H2Mobility, ein Joint Venture von Automobilfirmen und Gase-Herstellern.

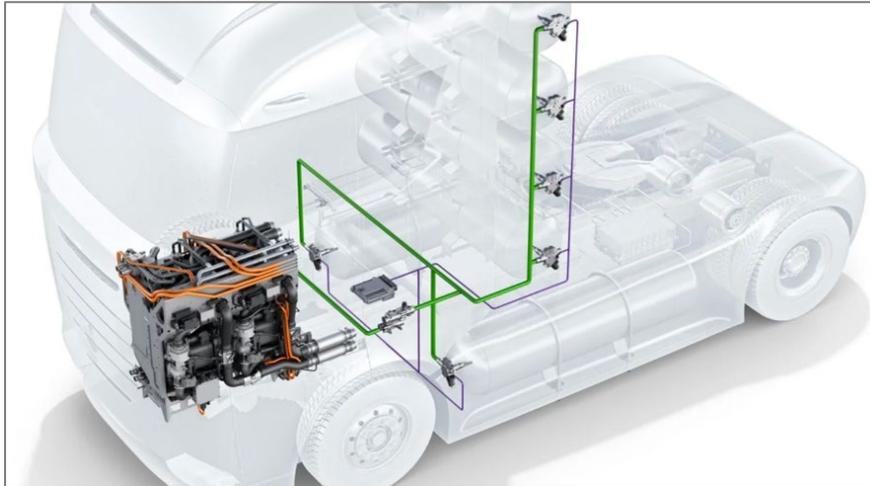


Abbildung 4.13: Bosch Brennstoffzellen-Antrieb im LKW (26)



Abbildung 4.14: Avia Tankstelle in St. Gallen mit Brennstoffzellen-LKW und -PKW und Wasserstoff-Tanksäule (27)

In der Schifffahrt nehmen die Aktivitäten zu Wasserstoff-Brennstoffzellen ebenfalls an Fahrt auf. So hat die französische Firma EODev schon mehr als 60 Stromversorgungen (in Schiffen und in stationären Generatoren) mit der Brennstoffzelle aus dem Toyota Mirai installiert (36). In Skandinavien gibt es ebenfalls eine ganze Reihe von Aktivitäten, um beispielsweise Fähren mit Wasserstoff-Antrieben auszurüsten.

Auch die Anpassung von Dieselmotoren auf den Betrieb mit Wasserstoff wird von den traditionellen Herstellern wie Deutz, RollsRoyce Power Systems und vielen anderen vorangetrieben. Diese Motoren sind für hohe Leistungen und Anwendungen in Baumaschinen, LKW oder Stromgeneratoren gedacht. Mit Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotoren haben allerdings je nach Anwendung (Fahrprofil) einen deutlich niedrigeren Wirkungsgrad als Brennstoffzellen-Elektroantriebe. Das geht direkt mit der Reichweite oder Betriebszeit mit einer Tankfüllung einher. Ein Vorteil von Verbrennungsmotoren sind die deutlich niedrigeren Anforderungen an die Qualität des Wasserstoffes im Vergleich zu Brennstoffzellen.



Abbildung 4.15: Wasserstoff-Yacht der Firma EODev mit der Brennstoffzelle aus dem Toyota Mirai (28)

Für die Bodenseeschifffahrt sind die folgenden Hinweise wichtig: Die Speicherung von Wasserstoff an Bord hat einen deutlich größeren Platzbedarf (etwa Faktor 4 mit 700 bar Speichern) im Vergleich zu Diesel/Benzin. Die zylinderförmigen Druckgasbehälter müssen geschickt in das Schiff integriert werden. Daraus resultiert, dass Wasserstoff-Antriebe primär für neue Fahrgastschiffe (angepasstes Design) oder Fähren geeignet sind. Bei der Betankungsinfrastruktur und Versorgung mit Wasserstoff sollten Synergien zum Transportsektor (LKW) und dem öffentlichen Nah- und Regionalverkehr (Busse, Züge) gesucht werden.

#### 4.4 Motoren für flüssige, klimaneutrale Kraftstoffe

Bei typischen Umgebungstemperaturen sind flüssige Kraftstoffe ideal für jede mobile Anwendung: Sie lassen sich einfach an Bord speichern, und der Tank kann an die meist begrenzten Platzverhältnisse angepasst werden. Wie bereits beschrieben ist Methanol aufgrund seiner einfachen chemischen Struktur der am einfachsten synthetisch herstellbare Kraftstoff. Methanol hat einen Heizwert von 5,5 kWh/kg und 4,4 kWh/l. Das ist etwa die Hälfte des Heizwertes von Benzin mit 11,3 kWh/kg und 9,8 kWh/l. Das bedeutet unter der Annahme des gleichen Wirkungsgrades bei der Umwandlung des Kraftstoffes über einen Verbrennungsmotor in mechanischen Antriebsenergie die doppelte Größe des Tanks. Das ist allerdings deutlich besser als die Energiespeicherung in Batterien (0,2 kWh/kg oder 0,3 kWh/l), selbst unter Berücksichtigung des deutlich höheren Wirkungsgrades der Energiewandlung bei elektrischen Antrieben. Auch die Zeit für das Füllen des Speichers (Tanken) ist sehr viel kürzer als das Laden von Batterien.

Für die Bordstromversorgung von Yachten und Wohnmobilen werden schon seit einigen Jahren Brennstoffzellen, die mit Methanol betrieben werden, auf dem Markt angeboten (34). Diese kleinen Stromgeneratoren der Firma SFC Energy haben nur sehr kleine Leistungen (bis zu 125 Watt) und sind nur für Elektroboote mit kleiner Leistung als Range Extender (Erhöhung der Reichweite durch Nachladen der Batterie an Bord) verfügbar (35). Das Methanol wird in Kanistern über den Handel geliefert.

Für größere Antriebsleistungen sind nur Verbrennungsmotoren sinnvoll. Dabei kann Methanol sowohl in Benzin- als auch in Diesel-Motoren eingesetzt werden. Dafür müssen die Motoren allerdings an die Eigenschaften dieses Kraftstoffes angepasst werden. Das betrifft sowohl den

Orders for 'Methanol-ready' Vessels		
Ordering Company	Number of Vessels	Vessel Type
Maersk	25	Small, medium and large container ships
Evergreen Marine	24	Large container ships
CMA CGM	24	Large container ships
Cosco Shipping	16	Large container ships
Algoma Central	9	Product tankers, bulk carriers
J. Lauritzen	3	Large bulk carriers
Mitsui	2	Large bulk carriers
Ørsted	2	Service vessels for offshore wind

Abbildung 4.16: Anzahl der Schiffe, die derzeit mit Methanol-tauglichen Motoren gebaut werden (29)

Verbrennungsprozess als auch Werkstoffe für Dichtungen oder die fehlenden

Schmiereigenschaften von Methanol. Methanol wird auch häufig im Rennsport eingesetzt wie zum Beispiel in der IndyCar-Serie. Die Abgasnachbehandlung ist bei Methanol dagegen sehr einfach, da die möglichen Schadstoffe im Abgas wie Methanol, Formaldehyd oder Ameisensäure sehr einfach und vollständig oxidativ entfernt werden können. Angepasste und marinetaugliche Diesel-Motoren sind heute von vielen Motorenherstellern verfügbar (MAN) oder in der konkreten Anpassungsentwicklung (Rolls Royce Power Solutions, Scania). Hintergrund ist, dass E-Methanol heute insbesondere in der internationalen Schifffahrt schnell an Bedeutung gewinnt (Abbildung 4.16 und 4.17). Für kleinere Leistungen (ab 60 kW) hat der chinesische Hersteller Geely Benzin-Motoren auf Methanol angepasst. Diese sind aber bislang noch nicht für maritime Anwendungen wie in Sportbooten entwickelt worden. Der von der Fa. Obrist entwickelte HyperHybrid mit dem extrem leisen Zero Vibration Generator auf der Basis von Methanol als Kraftstoff ist mittelfristig eine sehr attraktive Option für Sportboote (30).

Für eine klimaneutrale Schifffahrt auf dem Bodensee ist Methanol langfristig die attraktivste Option, da sie grundsätzlich für alle Schiffstypen und Leistungsbereiche einsetzbar ist. Allerdings kann Methanol nicht in den heutigen Motoren eingesetzt werden. Da sich der komplette Antriebsstrang mit Methanol als Kraftstoff nur unwesentlich von den heutigen Antrieben auf Basis von Benzin oder Diesel unterscheidet, ist ein Motorentausch in der Bestandsflotte mit dieser Technologie mit Abstand am einfachsten zu realisieren. Alte und defekte Diesel- oder Benzin-Motoren können relativ einfach durch klimaneutrale Methanol-Antriebe ersetzt werden.

Die Betankungsinfrastruktur unterscheidet sich nur geringfügig von der heutigen Infrastruktur für Benzin und Diesel. In China sind etwa 30.000 PKW im Einsatz, die auf mit M100 umgerüsteten Tanksäulen versorgt werden.

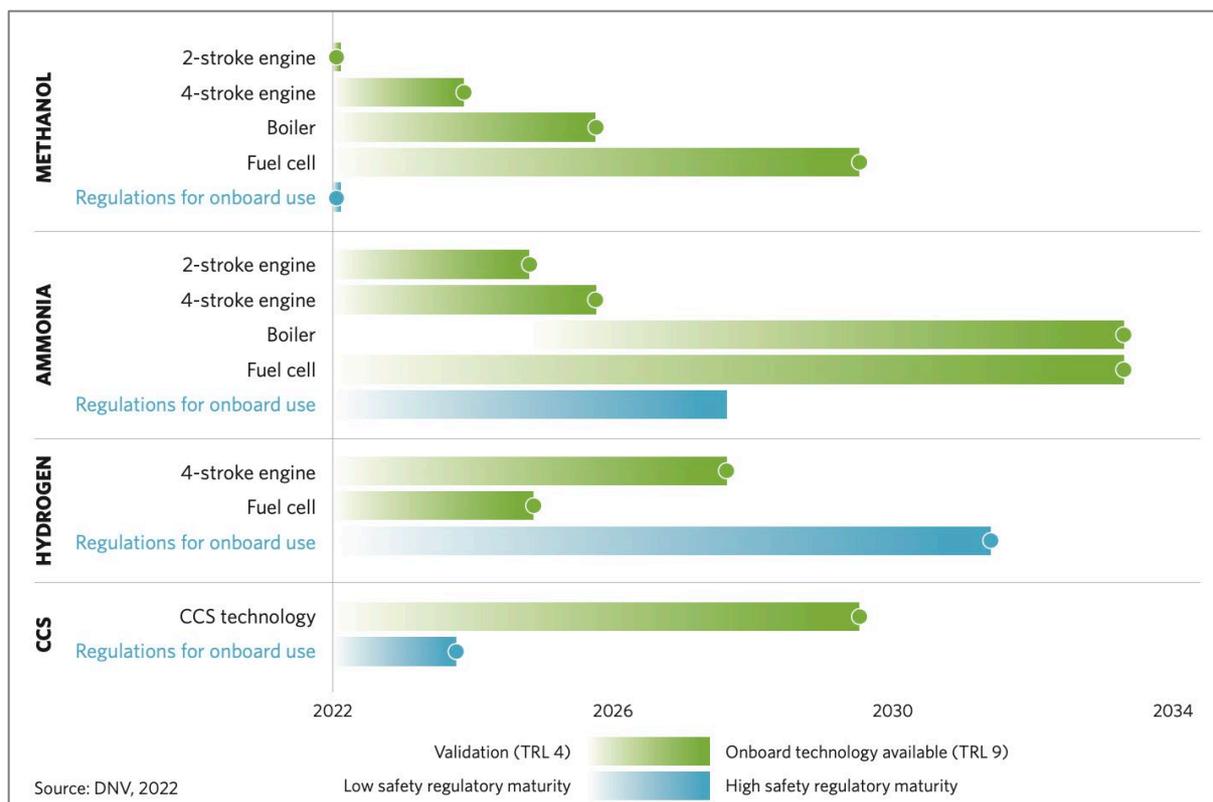


Abbildung 4.17: Reifegrad von klimaneutralen Antriebstechnologien die internationale Schifffahrt (37)

Die Verfügbarkeit von klimaneutralem E-Methanol wird sich in den kommenden Jahren aufgrund der starken Nachfrage sehr schnell erhöhen. Das weltweite Potential wird für das Jahr 2050 mit 400 Millionen Tonnen beziffert. Unter Berücksichtigung der weiter steigenden CO<sub>2</sub>-Preise wird E-Methanol bei großtechnischer Produktion zu wettbewerbsfähigen Preisen verfügbar sein (37). Natürlich kann vorübergehend auch Methanol, das aus Erdgas erzeugt wurde und heute in großen Mengen produziert wird, temporär eingesetzt werden, um den Transformationsprozess einfacher zu gestalten indem man das Einsatzdatum der Methanol-Motoren von der Verfügbarkeit von E-Methanol entkoppelt. Dies entspricht dem strategischen Ansatz der internationalen Schifffahrt, mit sogenannten Dual Fuel Motoren zu arbeiten. So können die neuen Motoren, die aktuell in die Containerschiffe eingebaut werden, sowohl mit emissionsarmen Dieselkraftstoffen als auch mit Methanol betrieben werden. Für Diesel-betriebene Schiffe auf dem Bodensee bietet sich auch HVO als temporäre Brückenlösung an, auch wenn die reale Klimawirkung sehr begrenzt ist (siehe hierzu die Analyse in Kapitel 4.1).

Die begrenzte Verfügbarkeit von biogenen Kraftstoffen und deren mögliche Rolle als Brücke bis zur ausreichenden Verfügbarkeit von E-Methanol ist anschaulich in Abbildung 4.18 zu erkennen. Ab

dem Jahr 2030 wird mit einem deutlichen Anstieg der E-Fuels (im Diagramm als PtX bezeichnet = Power to Fuel) im Marinesektor gerechnet. Wie zuvor beschrieben, wird das primär Methanol sein.

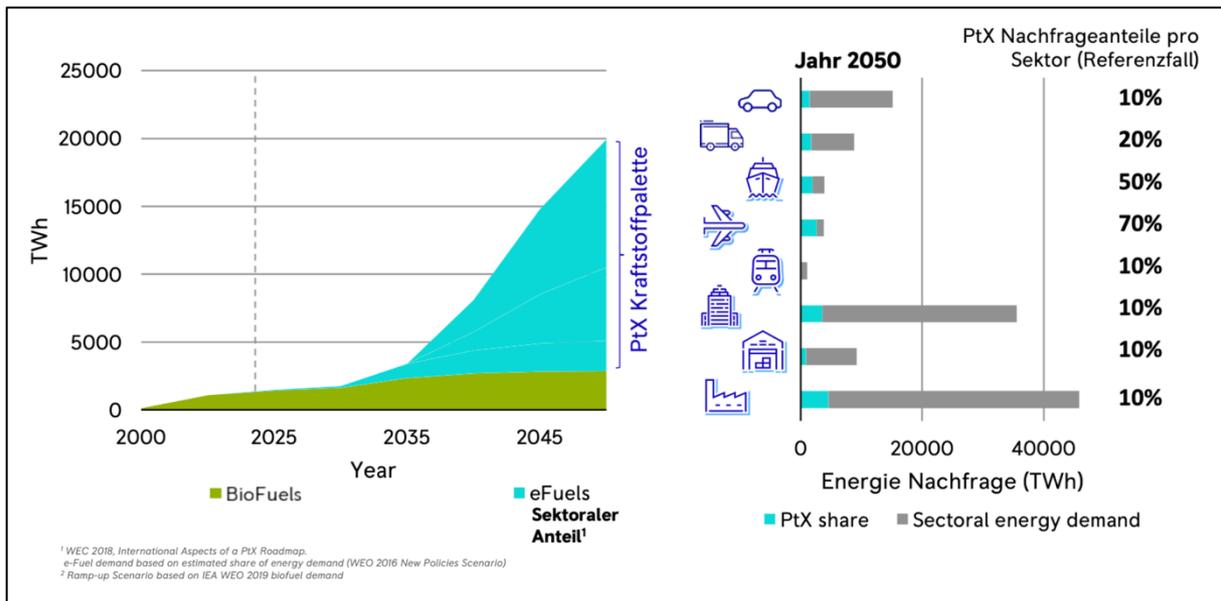


Abbildung 4.18: Begrenzte Verfügbarkeit und Brückenfunktion von biogenen Kraftstoffen (HVO) und E-Fuels (E-Methanol) in der Schifffahrt (linke Grafik) und Anteile der E-Fuels in den jeweiligen Sektoren (43)

Beim Thema E-Fuel und Verbrennungsmotoren wird immer wieder der schlechte Wirkungsgrad als kritisches Argument aufgeführt. Für die Kraftstoffherstellung unter Einbeziehung aller Aspekte wie Verfügbarkeit von sehr günstigem Strom aus Sonne und Wind, der essentiellen Speicherung der Energieträger und deren Transport ist diese Kritik nicht haltbar, wie auf S. 24 f erläutert wurde. Beim Verbrennungsmotor hängt der Wirkungsgrad sehr stark vom Betriebsmodus in der jeweiligen Anwendung ab. Bei Leerlauf und Teillast haben Verbrennungsmotoren einen sehr schlechten Wirkungsgrad. Im optimalen Betriebspunkt sind allerdings Wirkungsgrade von mehr als 45 Prozent möglich. Mit neuen Technologien (Kraftstoff-Reformierung) wurden sogar schon Wirkungsgrade von 60 Prozent erreicht. Für viele Anwendungen mit sehr variablen Betriebsmodi (PKW, Sportboote) sind serielle Hybridantriebe eine attraktive Lösung: Der konstant mit hohem Wirkungsgrad betriebene Verbrennungsmotor lädt über einen Generator die relativ kleine Batterie eines Elektroantriebes. Damit sind ganzheitlich betrachtet attraktive Antriebslösungen mit allen Vorteilen eines flüssigen Energieträgers möglich. Die Vorarlberger Firma Obrist hat Fahrzeuge mit dieser Antriebstechnologie erfolgreich demonstriert (30).

Im Zusammenhang mit dem Trinkwasserspeicher und Ökosystem Bodensee, ist das Gefährdungspotential durch die Kraftstoffe ein ganz entscheidender Aspekt. In Abbildung 4.19 wird dieses Thema am Beispiel der letalen Dosis für Fische anschaulich dargestellt. Es zeigt sich, dass Methanol im Vergleich zu allen anderen Kraftstoffen mit Abstand am wenigsten schädlich ist. Im Vergleich zum heutigen Benzin ist Methanol für Fische um den Faktor 2.000 weniger gefährlich. Ergänzend ist zu bemerken, dass sich Methanol aufgrund seiner guten Löslichkeit in Wasser schnell verdünnt und auch durch natürliche Prozesse sehr zügig abgebaut wird.

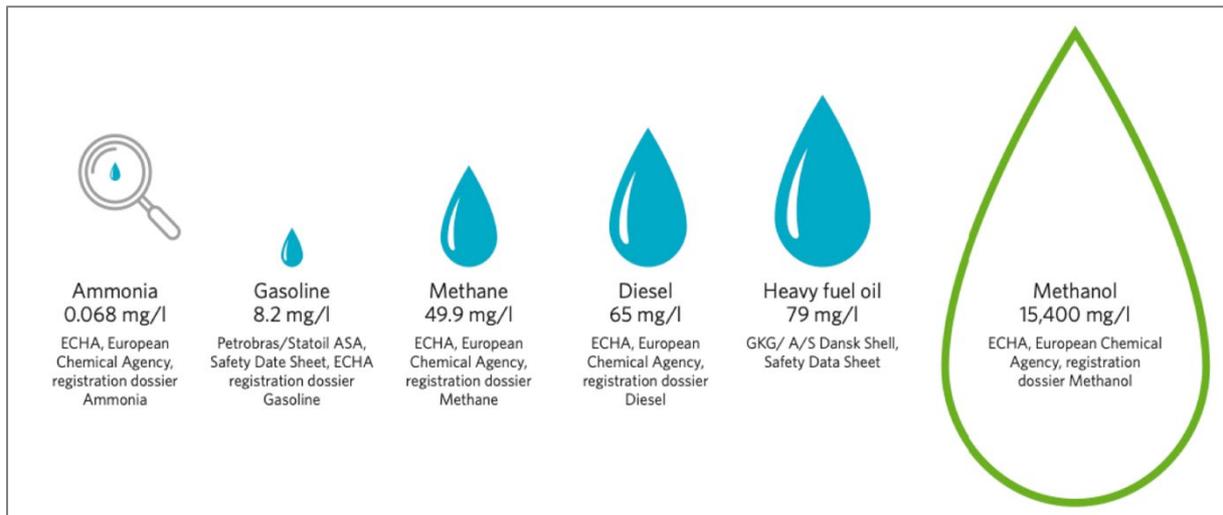


Abbildung 4.19: Letale Konzentration LC 50 verschiedener Kraftstoffe, bei der 50 Prozent einer Fischpopulation sterben (37)

Für eine konkrete Umsetzung müssen allerdings noch eine ganze Reihe von Fragestellungen beantwortet werden:

- Ab wann und zu welchen Konditionen ist E-Methanol am Bodensee verfügbar?
- Ab wann sind Methanol-taugliche Schiffsmotoren in den für den Bodensee relevanten Leistungsklassen und zu welchen Konditionen verfügbar?
- Was muss konkret für die Anpassung der Betankungsinfrastruktur und die Versorgung mit Methanol getan werden?
- Ist ein gemeinsames Vorgehen vorstellbar, um attraktive Konditionen bei der Beschaffung von Kraftstoffen und Motoren zu ermöglichen?
- Anpassung der BSO und anderer Regelwerke, um Methanol als Kraftstoff für die Bodenseeschifffahrt zu ermöglichen.

Die Verfügbarkeit von E-Benzin, das für 90 Prozent aller Motorsportboote notwendig wäre, ist bislang nicht sichtbar. Für den Aufbau einer globalen Produktion müssten 10, eher 15 Jahre angenommen werden. Der politische Fokus liegt heute bei E-Kerosin für die Luftfahrt. Das neue RED 3 Regelwerk fordert aktuell nur 3 Prozent dieses RFNBO-Kraftstoffes bis 2030. HVO-Kraftstoff kann in den meisten heutigen Dieselmotoren verwendet werden. Die Sinnhaftigkeit wurde im entsprechenden Abschnitt der Studie (S. 27 f) bereits ausführlich dargestellt. Für Benzin-Motoren wird es bis 2040 keine klimaneutralen Kraftstoffe, die in den vorhandenen Motoren eingesetzt werden können, geben. Damit macht es für die Bestandsflotte keinen Sinn auf solche „drop-in“ Kraftstoffe zu hoffen.

**Batterie-elektrische Antriebe sind nur für langsam fahrende Schiffe und kurze Strecken sinnvoll. Elektrisch betriebene Fähren können nur mit rund um die Uhr verfügbarem CO<sub>2</sub>-freiem Strom klimaneutral werden.**

**Mit E-Methanol betriebene, moderne Verbrennungsmotoren haben das größte Anwendungspotential in der Bodensee-Schifffahrt.**

**Eine detailliert ausgearbeitete, abgestimmte und langfristig orientierte Transformationsstrategie ist entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung.**

## 5. Stakeholder-Beteiligung

Am „Lebensraum Bodensee“ ist eine große Anzahl von Interessensgruppen beteiligt. Der See ist als überregionaler Trinkwasserspeicher für mehr als vier Millionen Menschen von essentieller Bedeutung. Die Bodenseeregion bietet mehr als vier Millionen Menschen Lebens- und Arbeitsraum und ist mit jährlich mehr als 13 Millionen Gästeübernachtungen ein beliebtes Erholungs-, Tagungs- und Tourismusziel. Die Wirtschaftsleistung ist mit 277 Mrd. Euro – das sind jährlich pro Kopf 66.400 Euro - hoch. Zum Vergleich: Der Durchschnitt liegt in Deutschland bei 46.264 Euro. Dazu zählen neben der Industrie und dem Tourismus auch der Obst- und Weinanbau mit überregionaler Bedeutung. Die Region hat einen international exzellenten Ruf als Innovationsführer in vielen High-Tech Branchen.

Im Rahmen der Studie sollten möglichst viele der in Abbildung 5.1 aufgezeigten Akteure berücksichtigt werden. Es liegt in der Natur der Sache, dass die Interessenlagen teilweise sehr gegensätzlich sind: von der touristischen Nutzung in all ihren Ausprägungen bis zu den Menschen, die ihren Unterhalt in Zusammenhang mit Booten verdienen, ob Bootsbauer oder Fischer (Abbildung 5.2).

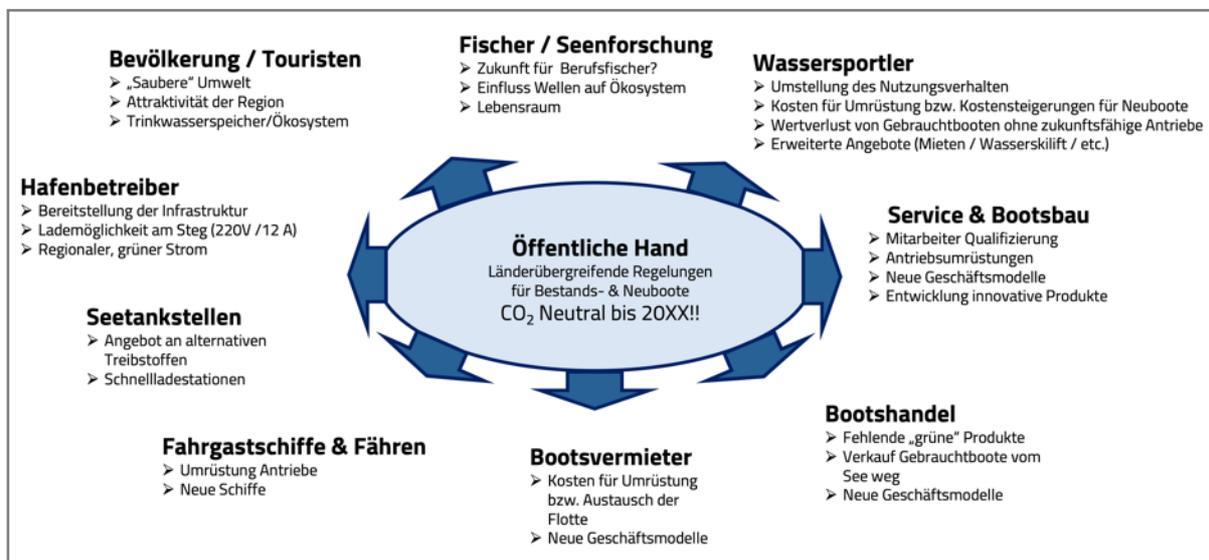


Abbildung 5.1: Interessengruppen am Lebensraum Bodensee

Mit den Beteiligten zum Thema Sportboote einerseits und zum Thema Berufsschiffahrt andererseits wurden umfassende Informations- und Diskussionsveranstaltungen durchgeführt. Im Nachgang konnten die Beteiligten nochmals ihre Anliegen einbringen. Die Protokolle im Kapitel 8.5 Anhang geben einen guten Überblick über die Inhalte der Besprechungen. In den finalen Protokollen



Abbildung 5.2: Impressionen zur Vielfalt der Interessen am Lebensraum Bodensee

sind auch die Rückmeldungen aller Teilnehmer enthalten. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte nochmals zusammengefasst:

### 5.1 Stakeholder-Treffen Sportboote

Das Treffen fand am 7. Juli 2023 im Landratsamt Konstanz statt. Unter den 25 Teilnehmern waren die relevanten Verbände (Hafenbetreiber, Werften, Bootshändler, Wassersport), Vereine, Vertreter von Umweltämtern und Instituten, das Bundesamt für Verkehr der Schweiz, das Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, das Schifffahrtsamt Konstanz und die IBK vertreten.

Die Teilnehmer begrüßten die Erstellung einer umfassenden Machbarkeitsstudie. Weitgehende Einigkeit gab es darüber, dass eine nachhaltige Mobilität auf dem Bodensee angestrebt werden muss und dass dabei alternative Kraftstoffe wie e-Fuel eine wichtige Rolle spielen können. Ein wichtiges Anliegen der Teilnehmer war es, dass seitens der Politik klare Regelungen und Ziele bis zum Jahr 2040 formuliert werden. Solche regulatorischen Leitplanken seien vor allem deshalb

unumgänglich, um Investitionssicherheit und Planbarkeit sicherzustellen. Dabei sollen auch Bedürfnisse aller Menschen, die den See nutzen, berücksichtigt werden.

Es wurde vereinbart, dass der Verbrauch der Sportboote und die konkreten Vorschriften zu Abgasen noch detaillierter herausgearbeitet werden müssen. Die Schaffung einer Infrastruktur für klimaneutrale Kraftstoffe, insbesondere Methanol, wurde von allen Beteiligten befürwortet.

In der Schlussrunde äußerten die Teilnehmer ihre Wünsche und Anregungen. Dabei wurde mehrmals die Verfügbarkeit von e-Fuels als direkter Ersatz für Benzin und Diesel als vielversprechende Option genannt. Allerdings könnte dies voraussichtlich noch 10-15 Jahre dauern. Einige Teilnehmer befürworteten auch die Einführung von Geschwindigkeitsbegrenzungen als schnelle Maßnahme zur Reduzierung von Emissionen. Große Zustimmung fand die Aufforderung an die Politik, sich zwar auf die Belange des Klimaschutzes zu konzentrieren, gleichzeitig aber auch alle Nutzer und Betroffenen des Bodensees rechtzeitig auf kommende Veränderungen vorzubereiten. Auf der Basis der Innovationskraft der Bodenseeregion könnten auch Entwicklungen zu klimafreundlichen Schiffsantrieben / Bootskonzepten aus der Region heraus stattfinden, die im weltweiten Markt für Schiffe nur eine Nische darstellt.

## **5.2 Stakeholder-Treffen Berufsschifffahrt**

Zum Treffen am 18. August 2023 bei der BSB Konstanz (Bodenseeschifffahrt Konstanz) fanden sich Vertreter der vier großen Betreiber von Fahrgastschiffen und Fähren, der Verband der „kleinen“ Betreiber von Fahrgastschiffen sowie die Schifffahrtsämter von Friedrichshafen und Konstanz ein.

Die Erwartungshaltung der Teilnehmer umfasste alle Möglichkeiten für eine klimaneutrale Schifffahrt auf dem Bodensee. Zu erwartende Finanzierungsprobleme für eine Umstellung auf klimaneutrale Schiffe und bereits vorhandene technologische Fortschritte kamen ebenfalls zur Sprache. Erkannt wurde auch die Notwendigkeit einer gemeinsamen Vorgehensweise.

Die BSB plant, alle ihre Schiffe bis 2035 klimaneutral zu betreiben und setzt bereits heute alternative Antriebe ein.

In der Diskussion über Kraftstoffoptionen gab es unterschiedliche Meinungen bezüglich der Alternativen Wasserstoff, Strom/Batterien und E-Methanol. Einige argumentierten, dass Wasserstoff energieaufwendig in der Produktion sei, während andere betonten, dass Wasserstoff mittelfristig kostengünstig werden wird.

Beim Thema „Herausforderungen und Anliegen“ gab es vor allem Bedenken bezüglich der Wirtschaftlichkeit von alternativen Kraftstoffen. Die Option, baldmöglichst die Geschwindigkeit von Berufsschiffen zu reduzieren, wurde aufgrund wirtschaftlicher Argumente (2-Schicht-Betrieb für die Besatzung) kritisch betrachtet. Die Anpassung der Schiffsstrukturen an neue Technologien ermöglicht auch deutliche Einsparungen beim Energieverbrauch.

Das Treffen endete mit dem Wunsch nach regelmäßigen weiteren Treffen und der Erwartung, gerade die Kernaussagen und Strategien für eine emissionsfreie Zukunft auf dem Bodensee möglichst gemeinsam zu entwickeln.

### **5.3 Die vielen weiteren Interessensgruppen**

#### Fragen an Behörden, Verbände und Hafенbetreiber

Zu Beginn der Studie wurden auch Fragen zum Ökosystem Bodensee über die Geschäftsstelle der IBK an die verantwortlichen Stellen und Akteure rund um den Bodensee gestellt (siehe Kapitel 8.4 Anhang). Von den etwa 25 Rückmeldungen gab es auch 11 Antworten auf diese beiden Fragen:

- *Gibt es Daten zur Verunreinigung des Wassers und der Sedimente (Hafen, See), die auf Verbrennungsmotoren (Ruß, Öl, Kraftstoffe) und auf Unterwasseranstriche (Antifouling) zurückzuführen sind? Bei den Daten wäre auch die Entwicklung über die letzten Jahre hilfreich. Falls Ihnen keine oder nur teilweise Daten vorliegen, kennen Sie Organisationen, die uns hier weiterhelfen können?*
- *Gibt es Erkenntnisse zur Auswirkung des von Sportbooten verursachten Wellenschlages auf die Ufergürtel und auf andere Freizeitaktivitäten wie Schwimmen, Paddeln etc.?*

Die Antworten sind wie folgt zusammengefasst:

- Jeder Hafen, welcher Ausbaggermaßnahmen durchführen möchte, muss bei der Beantragung der Maßnahmen ein Bodengutachten durchführen lassen. Diese Bodenproben werden in entsprechenden Labors untersucht. Die Ergebnisse werden beim Landratsamt Bodenseekreis dem Amt für Wasser- und Bodenschutz übermittelt
- Die in letzter Zeit durchgeführten Arbeiten zeigten keine besonderen Belastungen mehr. Daraus lässt sich schließen, dass belastetes Material bereits zu einem hohen Grad entfernt ist und die Bemühungen zum Umweltschutz und der Gewässerreinigung positive Auswirkungen zeigen. Zu diesen Maßnahmen können u. a. die konsequente

Abwasserentsorgung, der Verzicht auf Reinigungsmittel bei der Schiffs-Außenreinigung, verbesserte Schifffarben/Antifouling, Tank- und Altöleentsorgungseinrichtungen mit modernster Technik und regelmäßige Mitarbeiterschulungen hinzugezählt werden. Grundsätzlich sind die Konzentrationen relativ niedrig, und es besteht das Problem der klaren Unterscheidbarkeit von Verbrennungsrückständen aus dem Schiffsverkehr und Immissionen aus Verbrennungsprozessen an Land (Hausbrand, Kfz-Verkehr, industrielle Prozesse).

- Auswirkungen des Wellenschlages werden in der Regel erst über längere Zeiträume bemerkbar. Zudem können Schiffswellen nur mit aufwendigen Messverfahren und statistischen Analysen von Windwellen unterschieden werden. Es ist aus diesen Gründen schwierig bis unmöglich, Auswirkungen des Wellenschlages von Berufsschiffahrt und Freizeitbooten zu trennen. Bezüglich des schädlichen Sog- und Wellenschlags durch freizeitbedingte Schifffahrt auf die Ufergürtel sowie auf andere Seenutzer liegen aus den vergangenen Jahren keinerlei Feststellungen (Ufergürtel) oder Beschwerden (Seenutzer) vor. Was den Ufergürtel anbelangt, hängt dies natürlich auch maßgeblich mit den vor Ort vorhandenen Pegelständen ab. Schädliche Auswirkungen auf den Ufergürtel könnten eventuell bei entsprechenden Hochwasserlagen entstehen, wobei der verursachte Wellenschlag von Sportbooten dazu eher ungeeignet erscheint. Die Auswirkungen von durch Starkwind- und Sturmereignissen erzeugtem Wellenschlag bei entsprechenden Hochwasserlagen wäre als Ursache für negative Einflüsse auf den Ufergürtel viel eher in Betracht zu ziehen.
- In mehreren Forschungsprojekten wurden die negativen Auswirkungen von Schiffswellen auf den Sedimenthaushalt der Ufer- und Flachwasserzonen, die Fischfauna und die Unterwasservegetation gezeigt. Hierzu gibt es jeweils umfangreiche Projektberichte, wissenschaftliche Veröffentlichungen und Handlungsempfehlungen. Derzeit werden im Projekt SUBOLakes, das von der Universität Konstanz koordiniert wird, Belastungen der Ökosysteme durch die Fahrgastschiffahrt in einem bundesweit durchgeführten Projekt zusammengetragen (32).

#### **5.4 Interviews mit diesen Interessensgruppen**

In diesem Zusammenhang wurden an 4 Wochenenden mehr als 40 Personen, darunter Anwohner, Touristen, Maritime Sportbootwirtschaft (Herstellung, Handel, Service und Infrastruktur für die Hafengebietebetreiber), Werften und Fischer, in persönlichen und ausführlichen Interviews befragt. Zusammenfassend zeigen die Antworten fast aller Befragten ein wachsendes Bewusstsein für den

Klimawandel und die Bereitschaft, umweltfreundliche Schifffahrtsoptionen zu unterstützen, um den Bodensee als wertvollen Lebens- und Arbeitsraum zu schützen und zu erhalten.

Die Kernaussagen der befragten Personen und Institutionen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Passagiere, Touristen und Anwohner, die heute die Berufsschifffahrt auf dem Bodensee nutzen, würden bezahlbare umweltfreundliche Alternativen unterstützen. Maritime Sportbootwirtschaft und Werften wollen den Wandel hin zu einem klimaneutralen Bodensee aktiv mitgestalten und fordern klare rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Berufsfischer fordern Maßnahmen zur Eindämmung von Umweltauswirkungen, um ihre Existenzgrundlage unter wirtschaftlichen Bedingungen erhalten zu können.

#### Aussagen zur heutigen Berufsschifffahrt

Viele Touristen und Anwohner berichten, dass das Fahren mit Fähren und Schiffen auf dem Bodensee ihnen die einzigartige Möglichkeit bietet, die Region zu erkunden und die Schönheit der Umgebung zu genießen. Dieses „entschleunigte“ Fahren ermöglicht Entspannung und ein besonderes Sightseeing-Erlebnis. Gerade in Zeiten des Klimawandels äußern sich Fahrgäste kritisch und haben Bedenken hinsichtlich der Verwendung von Dieselmotoren auf den Schifffahrtsrouten im Bodensee. Diese Bedenken betreffen die Verbrennung von Dieselkraftstoffen, die zur Verschlechterung der Luftqualität führt, Lärmbelastung, die den Fahrkomfort beeinträchtigt, Dieselkraftstoff als nicht-erneuerbaren Energieträger, der zur Erschöpfung fossiler Brennstoffe beiträgt, und die Gefahr von Treibstoff- oder Ölleckagen durch Unachtsamkeit, die erhebliche Auswirkungen auf das Süßwasserökosystem haben und das Leben im Wasser gefährden kann."

#### Aussagen zur zukünftigen klimaneutralen Berufsschifffahrt

Mit der zunehmenden Sensibilisierung für den Klimawandel ist auch das Bewusstsein für die Umweltauswirkungen der verschiedenen Verkehrsmittel gestiegen, und die Mehrheit der Befragten würde heute den umweltfreundlicheren und emissionsärmeren Wasserverkehr bevorzugen. Dies schließt den Wunsch nach nachhaltiger Mobilität auf dem Wasser ein, wie z. Bsp. elektrische Antriebssysteme oder Motoren, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden. Die Mehrheit der Befragten zeigt sich auch bereit, für klimafreundliche Schifffahrten (Fähren, Rundfahrten oder Rundtouren) mehr zu bezahlen, sofern die Kosten im Rahmen bleiben.

### Aussagen von Touristen zur klimaneutralen Urlaubsregion Bodensee

Klimaschutz wird von der Mehrheit der befragten Touristen im Zusammenhang mit Urlaubsreisen als wichtig bis sehr wichtig eingestuft. Die Mehrheit der Befragten ist bereit, für einen klimafreundlichen Urlaub mehr Geld auszugeben, solange die Kosten überschaubar bleiben. Es wird deutlich, dass die Nachfrage nach umweltverträglichen Angeboten auf dem Wasser steigt und die Reduzierung motorisierter Boote befürwortet wird. Touristen unterstützen umweltfreundliche Alternativen, um die Wasserverschmutzung und Lärmbelastung auf dem Bodensee zu reduzieren.

### Aussagen von Anwohnern zum klimaneutralen Lebensraum Bodensee

Anwohner zeigen eine erhöhte Sensibilität für den Klimawandel und haben den Wunsch nach umweltfreundlichem Handeln. Klimaschutz auf und am Bodensee wird als sehr wichtig erachtet. Umweltfreundliche Alternativen zur Reduzierung von Wasserverschmutzung, Wellenschlag und Lärmbelastung auf dem Bodensee werden befürwortet. Es besteht der Wunsch nach mehr klimafreundlichen Freizeitangeboten für junge Menschen sowohl im als auch am Wasser, um den Bodensee auch für jüngere Generationen attraktiv zu erhalten. Der von den Booten und Schiffen erzeugte Wellenschlag, speziell an den Wochenenden, stört andere Freizeitsportler (Jollen, Paddel- & Ruderboote, SUP, etc.) oder Erholungssuchende (auf den Booten vor Anker oder am Strandbad) zunehmend und verstärkt die Spannungen zwischen den Motorbootfahrern und den restlichen Wassersportlern und Badegästen.

### Aussagen Maritime Sportbootwirtschaft zur klimaneutralen Wirtschaftsregion Bodensee

Es besteht eine Nachfrage nach elektrischen Antrieben für leistungsschwächere Boote, während diese bei leistungsstärkeren, großen Booten derzeit kaum vorhanden ist. Die Verbesserung der Ladeinfrastruktur und die Einführung neuer Konzepte wie beispielsweise Miete (statt Kauf) von Booten könnten die klimaneutrale Schifffahrt vorantreiben. Von dieser Gruppe wird erwartet, dass es bis 2035 keinen umfassenden regulatorischen Druck geben wird und ältere Boote nach 2035 Bestandsschutz genießen werden. Bürokratieabbau beim Aufbau der notwendigen neuen Infrastruktur wird als innovationsfördernd angesehen.

### Aussagen von Werften zur klimaneutralen Wirtschaftsregion Bodensee

Werften wollen den Wandel der Antriebstechnologien aktiv mitgestalten, um Arbeitsplatzverluste zu vermeiden und die Kundenbindung zu stärken. Sie streben einen Kompetenzaufbau im Bereich E-Antriebe an, einschließlich Schulungen, Ausrüstung und Lieferantenbeziehungen und hoffen auf Fördermittel zur Unterstützung. Die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle wie z. Bsp.

Bootsvermietung wird in Betracht gezogen. Klarheit über die zukünftigen regulatorischen Rahmenbedingungen wird als entscheidend für die Investitionssicherheit angesehen.

### Aussagen von Berufsfischern zur klimaneutralen Wirtschaftsregion Bodensee

Immer mehr Bodenseefischer geben wegen Fischmangels auf. Gründe dafür sind die Bedrohung der Laichplätze durch invasive Arten wie die Quagga-Muschel und der Stichling sowie der Einfluss von Kormoranen. Das hat zur Folge, dass fast 90 Prozent der in der Region verkauften Fische nicht aus dem Bodensee stammen. Die Mehrheit der Befragten wünschte sich eine wirksame Eindämmung invasiver Arten durch Maßnahmen wie die gründliche Reinigung und Desinfektion von Booten und Ausrüstung und die Reduzierung von Störungen durch Motorengeräusche, Wellenschlag und Schall sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen für Motorboote.

### Gespräch mit dem Institut für Seenforschung

Für die Experten des Instituts für Seenforschung ist der Wellenschlag das dominierende Problem sowohl für das Ökosystem als auch für historische Bauwerke (Beispiel: Pfahlbauten in Unteruhldingen). Sie machen große und schnell fahrende Schiffe für den schädlichen Wellenschlag verantwortlich. Als positives Beispiel für eine geringe Wellenbildung wird die MS Insel Mainau genannt, die elektrisch mit geringer Leistung und kleinen Propellern betrieben wird. Bei den Sportbooten sehen die Experten des Instituts vor allem Wasserski und Wake Boarding als problematisch an, insbesondere wenn diese Aktivitäten nicht weit genug vom Ufer entfernt stattfinden. Die HyMoBio-Handlungsempfehlungen (33) fassen die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zusammen. Das gesamte Thema Schifffahrt sollte in Bezug auf Geschwindigkeiten überdacht werden, für Urlauber auf einem Fahrgastschiff sollte Zeit kein Kriterium sein. Der Zusammenhang zwischen Schiffsform und Antrieb sollte hinsichtlich der Wellenbildung weiter untersucht werden.

Zum Schadstoffeintrag durch Verbrennungsmotoren (Beispiel Kohlenwasserstoffe) liegen keine aussagekräftigen Untersuchungen vor. Die Grenzwerte werden aufgrund des hohen Wasserdurchsatzes durch den Bodensee eingehalten.

Zusammenfassend sollte für das weitere Vorgehen vereinbart werden, dass alle Akteure am Bodensee

- eine ökologische Verantwortung zur Vermeidung von Klima- und Umweltschäden haben,
- soziale Verantwortung zeigen und akzeptieren, dass der See für alle da ist, gegenseitige Beeinträchtigungen freiwillig auf ein Minimum beschränken und
- sich in ihrem ökonomischen Handeln ihrer ökologischen und sozialen Verantwortung bewusst sind.

**Alle Interessensgruppen wollen den Bodensee als wertvollen Lebens- und Arbeitsraum schützen und erhalten und den Wandel zur Klimaneutralität aktiv mitgestalten.**

**Der Wunsch nach klaren rechtlichen Rahmenbedingungen und Regelungen wird von vielen Akteuren hervorgehoben.**

## **6. Transformationsprozess**

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie soll der Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Schifffahrt bis 2040 mit einem Zwischenschritt (Jahr 2030) dargestellt werden. Darüber hinaus ist es wichtig, das sich aktuell dynamisch verändernde politische und regulatorische Umfeld zu analysieren.

### **6.1 Heutiger regulatorischer Rahmen**

Auf der Klimakonferenz der Vereinten Nationen in Paris 2015 einigten sich 197 Staaten, darunter auch die Europäische Union (EU) und die Bodensee-Anrainerstaaten, unter anderem darauf, die menschengemachte globale Erderwärmung bis Ende des Jahrhunderts auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst unter 1,5 Grad Celsius zu halten. Um ihren Verpflichtungen Rechnung zu tragen, hat die EU 2021 festgelegt, bis 2050 der erste treibhausgasneutrale Kontinent zu werden. Um dies zu erreichen, legt die EU Zwischenziele für die Jahrzehnte bis 2050 fest. So sollen die Emissionen an Treibhausgasen bis 2030 um 55 Prozent reduziert werden.

Die extreme Abhängigkeit vom Import fossiler Kraftstoffe und die damit zusammenhängenden enormen geopolitischen Verwerfungen stellen ebenfalls ein wichtiges politisches Handlungsfeld dar, das viele Synergien zu den Klimaschutzmaßnahmen beinhaltet.

Deutschland hat im Jahr 2021 ein novelliertes Klimaschutzgesetz verabschiedet, das die Klimaneutralität bis 2045 festschreibt. Die Schweiz hat in einer Volksabstimmung im Juni 2023 beschlossen, bis 2050 klimaneutral zu werden. Die Länder Bayern und Baden-Württemberg haben das politische Ziel bis 2040 klimaneutral zu werden. Viele Kommunen am Bodensee (u.a. Konstanz, Friedrichshafen, Lindau) haben verkündet, eine Klimaneutralität bis 2035 zu erreichen. Nachdem die Bodenseeschifffahrt eng mit den Kommunen verknüpft ist (Eigentümer von Schiffsbetreibern oder der Häfen), haben diese Vereinbarungen auch für die Bodenseeschifffahrt eine hohe Relevanz.

Für die nationalen Seen der Anrainerstaaten gibt es derzeit sehr unterschiedliche Regelungen. So sind diese für die Bayerischen Seen sehr restriktiv: Auf dem Chiemsee sind keine privaten Motorboote erlaubt, auf dem Ammersee ist die Anzahl auf 150 und auf dem Starnberger See auf 255 Lizenzen begrenzt. Auf den Seen des Salzkammergutes besteht in den Sommermonaten ein Fahrverbot für private Motorboote. Der Schweizer Bundesrat hat ganz aktuell eine Postulatserklärung (39) verabschiedet, die sehr hilfreiche Informationen und Maßnahmen zum Klimaschutz in der Binnenschifffahrt aufzeigt.

Interessant ist der Vergleich der Binnenschifffahrt mit dem Straßenverkehr. Letzterer unterliegt weltweit und seit Jahrzehnten immer schärferen Regulierungen hinsichtlich der Emissionen von Schadstoffen wie Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO) oder Partikel (Beispiel Euro 6 Regelwerke für Benzin- und Dieselmotoren). Bei den Emissionen von Klimagasen werden die Anforderungen an die Antriebstechnologien immer strenger. Im Jahr 2019 wurden die Flottengrenzwerte für PKW und leichte Nutzfahrzeuge von der EU beschlossen und zwingen die Hersteller zu deutlichen Reduktionen beim Verbrauch fossiler Kraftstoffe. Die seit etwa zwei Jahren gültige „Clean Vehicle Directive“ adressiert die Beschaffung von klimafreundlichen Stadtbussen und Nutzfahrzeugen. Eine Vielzahl weiterer Regelwerke wird in Zukunft auch für die Bodenseeschifffahrt relevant werden. Ein Beispiel ist die „Renewable Energy Directive 3“ (RED 3), die in Kürze verabschiedet wird und auch sogenannte „Renewable Fuels of Non-Biological Origin“ (RFNBO) thematisiert. Der politische Schwerpunkt liegt heute allerdings auf E-Kerosin für die Luftfahrt, auch SAF (Sustainable Aviation Fuel) genannt (31). Der Vorteil von RFNBOs gegenüber Bio-Fuels ist der deutlich geringere Land- und Wasserverbrauch. Aber auch die für die Monokulturen eingesetzten Düngemittel und Pestizide werden bei den Biokraftstoffen sehr kritisch gesehen.

Für die internationale Schifffahrt hat die IMO (International Maritime Organisation) im Juli 2023 mit der Europäischen Union vereinbart, bis 2050 klimaneutral zu werden. Bis 2030 sollen die Klimagase um mindestens 20 Prozent - besser 30 Prozent - reduziert werden. Für die Binnenschifffahrt und konkret für den Bodensee gibt es bislang keine Regelungen zur Emission von Klimagasen.

So ist es für die Entwicklung des Transformationsprozesses sehr hilfreich, dass in der Gipfelerklärung 2022 der Regierungschefs der IBK bereits vereinbart wurde:

*'Wir setzen auf eine klimaneutrale Verkehrszukunft um den See und auf ihm. Ökologische und vernetzte Mobilität ist das Gebot der Stunde. Die Transformation soll möglichst schnell gelingen.'*

Ein definitiver Zeitpunkt für das Erreichen der Klimaneutralität der Schifffahrt auf dem Bodensee wurde allerdings noch nicht vereinbart. Aufgrund des sehr anspruchsvollen Transformationsprozesses einerseits und der aufgrund des Klimawandels hohen Dringlichkeit andererseits, erscheint das Jahr 2040 für die Erreichung der Klimaneutralität der richtige Zeitpunkt zu sein.

## 6.2 Mögliche Maßnahmen für die Bodenseeschifffahrt

Zu Beginn der Machbarkeitsstudie wurden Behörden, Verbänden und Instituten (siehe Kapitel 8.6) die beiden folgenden Fragen zur Klimaneutralität gestellt:

- *Welche Maßnahmen zum Thema klimaneutrale Schifffahrt haben Sie in Ihrem Verantwortungsbereich bereits ergriffen, sind kurzfristig geplant oder sind Ihnen bekannt?*
- *Welche Maßnahmen (regulatorisch, organisatorisch, freiwillig, etc.) können Sie sich vorstellen, um das Ziel der klimaneutralen Schifffahrt auf dem Bodensee zu erreichen?*

Es gingen folgende Antworten ein, die im Original und anonymisiert wiedergegeben werden:

- *Die Schweiz hat in zwei neuen Gesetzesentwürfen, die sich noch im Gesetzgebungsprozess befinden, rechtliche Grundlagen skizziert, welche die gewerbliche Schifffahrt finanziell unterstützen sollen, ihre Antriebstechnologien umzurüsten. Von diesen finanziellen Instrumenten sollen die konzessionierten Schifffahrtsunternehmen der Passagierschifffahrt und die Güterschiffe profitieren können.*
- *Ein zweites, baugleiches Schiff, wie die batterieelektrische Personenfähre MS Insel Mainau ist optional vorgesehen. Voraussichtliche Inbetriebnahme im Sommer 2025 (die Entscheidung steht derzeit noch aus). Durch das e-Schiff wird ein älteres, dieselbetriebenes Fahrgastschiff ersetzt*
- *Kurzfristig sollten Sportboote mit Verbrennungsmotoren keine Neuzulassung erhalten, um die Erneuerungsrate schrittweise zu reduzieren, ohne Härtefälle im bestehenden Bestand zu schaffen.*
- *Mittelfristig sollte der obligatorische Einsatz nahezu klimaneutraler Kraftstoffe wie E-Fuels in Betracht gezogen werden, sobald deren Verfügbarkeit und technische Kompatibilität ausreichend sichergestellt sind. Zusätzlich sollten klimaschützende Maßnahmen in der gewerblichen Schifffahrt weiter gefördert werden.*
- *Ein enger Austausch mit Industrieunternehmen, Instituten, Hochschulen und anderen Schiffsbetrieben ist von entscheidender Bedeutung, um technologieoffen alle verfügbaren Möglichkeiten zur klimaneutralen Betreuung älterer Flotten und großer Fahrgastschiffe zu untersuchen.*
- *Des Weiteren könnte eine freiwillige Selbstverpflichtung eingeführt werden, die besagt, dass zukünftige Schiffsneubauten nicht mehr mit Dieselantrieb ausgestattet werden dürfen. Diese Verpflichtung würde keine Benachteiligung bestehender Schiffe bedeuten.*
- *Neue Liegeplätze sollten vorrangig für Boote mit alternativen Antrieben vergeben werden.*

- *Es sollte eine allgemeine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit für Freizeit- und Berufsschiffahrt sowie die Einführung von Leistungsbeschränkungen erwogen werden. Zusätzlich sollten Maßnahmen zur Förderung von Lademöglichkeiten in den Häfen ergriffen werden.*
- *Höhere Besteuerung fossiler Kraftstoffe an den Seetankstellen. Schiffseigentümer sollten auch Beratungsangebote zum Umstieg auf alternative Motorisierung erhalten. Anreize in Form von Austauschprämien für umweltfreundliche Schiffe sollten geschaffen werden.*
- *Für den Erfolg dieser Bemühungen ist es wichtig, dass diese Maßnahmen technologieoffen sind und die Marktverfügbarkeit von Antriebstechnologien und synthetischen Kraftstoffen berücksichtigt werden.*
- *Die Förderung von alternativen Antrieben und Kraftstoffen, sowohl technisch als auch steuerlich, sowie die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Besteuerung sind unerlässlich.*

## Die möglichen Maßnahmen

Klimawandel und Energiekrisen werden sowohl Technologien als auch Statussymbole verändern. Diese Veränderung kann auch proaktiv gestaltet werden. Das Motto sollte sein, sparsame Schiffe und effiziente, leise Antriebe mit wenig Wellenbildung zu entwickeln. Die einfachste Methode ist dabei auch die Reduktion der Geschwindigkeit. Neue, attraktive Produkte könnten den Wandel vorantreiben. So würden „Hausboote“ (Verdränger) deutlich mehr Komfort bieten als die heutigen Yachten und gleichzeitig sehr viel weniger Kraftstoff verbrauchen. Auch der Ausbau von Angeboten zum Vermieten oder Chartern von Booten – statt besitzen – hätte einen positiven Einfluss auf die Ökobilanz und könnte von den Marinas stärker in neue Geschäftsfelder eingebaut werden. Dazu sollte die Zulassung komfortabler Verdränger mit klimaneutralen Antrieben (technologieoffen) auf dem Bodensee bevorzugt werden.

Im Folgenden werden die grundsätzlich denkbaren Maßnahmen für die Transformation zu einer klimaneutralen Schifffahrt auf dem Bodensee in verschiedene Kategorien unterteilt und mit einer kurzen Bewertung zusammengestellt. Eine Betrachtung der komplexen rechtlichen Rahmenbedingungen, wie sie ansatzweise in der Schweizer Postulats Erklärung aufgeführt werden (39), wird dabei nicht vorgenommen. Die von den Autoren empfohlenen Maßnahmen werden dann in Kapitel 7 zusammengeführt. Dabei sollte der Schwerpunkt auf die drei größten CO<sub>2</sub>-Emittenten, Motorsportboote > 37 kW, Fähren und Fahrgastschiffe, gelegt werden. Voraussetzung für eine konkrete Planung und Umsetzung aller Maßnahmen ist ein definitives Ende der Nutzung von fossilen Kraftstoffen auf dem Bodensee anzukündigen, um Planungs- und Investitionssicherheit für alle Beteiligten zu gewährleisten.

Anmerkung: Aus Sicht der Autoren ist die Klimaneutralität direkt an den Verzicht auf fossile Kraftstoffe gekoppelt. Eine vollständige, hundert-prozentige Vermeidung ist dabei nicht zwingend notwendig. Eine schnelle und pragmatische Vorgehensweise zur Abkehr von fossilen Kraftstoffen bei den größten Verbrauchern ist entscheidend. Die Kompensation von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Kauf von Zertifikaten wird nicht empfohlen. Dieses Instrument hat sich nicht bewährt und wird immer häufiger kritisiert, weil es vielfach zu Missbrauch einlädt und damit die Absicht der Klimaneutralität konterkariert (38).

Beim Transformationsprozess muss grundsätzlich zwischen Erstzulassungen (gebrauchte oder neue Boote) auf dem Bodensee und der Bestandsflotte unterschieden werden. Aufgrund der hohen Lebensdauer der Schiffe sind auch für die Bestandsboote Maßnahmen zur Erreichung von Kraftstoffeinsparungen oder eine Umrüstung auf klimaneutrale Antriebe von entscheidender Bedeutung (siehe Abbildung 6.3 und 6.4).

## **Internationales Leuchtturm-Projekt „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“ - Entwicklung und Umsetzung einer gemeinsamen Strategie zu Kraftstoffen und Antrieben der Zukunft**

Der Traum vieler Schiffseigner und Schiffsbetreiber lässt sich, wie in Kapitel 4 dargestellt, leider nicht so einfach realisieren. Klimaneutrale Kraftstoffe, die eins zu eins in bestehenden Motoren genutzt werden könnten, haben entweder aufgrund der auch in Zukunft geringen verfügbaren Mengen keine nennenswerte Klimawirkung (HVO-Kraftstoff als Diesel-Ersatz) oder sind, wenn überhaupt, erst langfristig verfügbar (E-Benzin, E-Diesel). Bezogen auf die drei Kategorien, die für 90 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich sind, sind E-Methanol und darauf angepasste Motoren die favorisierte Lösung. Neben der relativ kostengünstig anzupassenden Betankungsinfrastruktur ist der einfache Tausch auf Methanol-taugliche Motoren in den langlebigen Bestandsflotten ein weiterer entscheidender Faktor für das Erreichen der Klimaneutralität bis 2040. Allerdings sind heute Methanol-taugliche Motoren erst begrenzt verfügbar und E-Methanol steht noch nicht in ausreichender Menge zur Verfügung. Dies zu organisieren und umzusetzen bedarf eines gemeinsamen Vorgehens aller Akteure der Bodenseeanrainer (Leuchtturm-Projekt), gerade um die Kosten für die Umstellung insgesamt zu minimieren.

Für einen erfolgreichen Transformationsprozess ist eine langfristig angelegte und mit konkreten Meilensteinen versehene Strategie notwendig, die als gemeinsames Pilot-Projekt „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“ organisiert wird. Dazu gehören geförderte Pilotprojekte, um die Strategie abzusichern. Die Bodenseeregion zählt zu den innovativsten Wirtschaftsstandorten weltweit. In diesem Kontext sollten Entwicklungen zu klimafreundlichen Schiffsantrieben angestoßen und gefördert werden, um dann die daraus resultierenden Innovationen in die Welt zu tragen. Unter dem Motto „Aus der Nische in die Welt“ (ca. 40.000 Motor-Sportboote auf dem Bodensee und 15 Millionen weltweit) könnten sich neue, attraktive Chancen für den Wirtschaftsraum Bodensee ergeben. Auch sollten die Werften im Transformationsprozess unterstützt werden, z.B. durch Schulungsprogramme und den Aufbau der notwendigen betrieblichen Infrastruktur. Das Ziel ist, die Werften für die Umrüstung der Bestandsflotten auf klimaneutrale Antriebe zu ertüchtigen.

Ein aktives Monitoring der weltweiten Entwicklungen (Technologien, Produkte, Märkte) im Bereich der klimaneutralen Binnenschifffahrt und der effizienten Antriebe ist ebenfalls ein wichtiges Element dieser Strategie. Regelmäßige Informationen und Abstimmungen für und mit allen Stakeholdern sind unerlässlich.

Eine erste grobe Skizzierung der Vorgehensweise ist in Abbildung 6.1 dargestellt und sollte in einem nächsten Schritt detailliert ausgearbeitet werden. Dabei sind folgende Themen für die Aktivitäten bis 2027 zu berücksichtigen:

- Verantwortlichkeiten für die Ausarbeitung und Umsetzung der Strategie festlegen und die erforderlichen Budgets bereitstellen (professionelles Projekt-Management)
- Information aller Interessensgruppen über die Ergebnisse der Studie und die weiteren Fortschritte beim Transformationsprozess
- Einbindung der Stakeholder „Berufsschifffahrt“ und „Sportboote“ in die Aktivitäten unter Berücksichtigung von Synergien (z.B. Kraftstoff-Infrastruktur)
- Monitoring der weltweiten Aktivitäten zu E-Fuels und insbesondere zu E-Methanol, sowie zu Methanol-Motoren mit detaillierten Anfragen, um die folgenden Fragen beantworten zu können:
  - X Ab wann und zu welchen Konditionen ist E-Methanol am Bodensee verfügbar?
  - X Ab wann sind Methanol-taugliche Schiffsmotoren in den unterschiedlichen Leistungsklassen und zu welchen Konditionen verfügbar?
  - X Was bedeutet das für die Anpassung der Betankungsinfrastruktur und für die Versorgung mit Methanol?
- Eine gemeinsame Vorgehensweise, um den Aufwand der Umstellung insgesamt zu minimieren, ist entscheidend für den Erfolg.
- Anpassung der BSO an die Verwendung von Methanol als Kraftstoff auf dem Bodensee zu ermöglichen (Übernahme der Regelwerke der internationalen Schifffahrt)
- Entwicklung von effizienten Hybrid-Antrieben anstoßen (E-Antrieb mit Methanol-Range-Extender)
- Studie zum Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Bootsdesign und Antrieb auf die Wellenbildung, die Lärmemission und den Energieverbrauch
- Forschungsprojekte zur lokalen Erzeugung von E-Methanol und Wasserstoff initiieren
- Prüfung von alternativen Optionen zu E-Methanol
- Bestätigung der Kraftstoff- und Antriebsstrategie bis 12/25 und breite Umsetzung ab 12/27

Die Pilotprojekte zur Erprobung klimaneutraler Antriebe für Fahrgastschiffe und Sportboote sollten 2024 gestartet werden. Diese dienen der Verifikation und Absicherung der Strategie. Nach einer ausgiebigen Erprobung der Schiffe sollte mit der breiten Einführung des klimaneutralen Kraftstoffes und der Umrüstung der Antriebe begonnen werden.

Mögliche Maßnahmen:

Durchführung des Leuchtturm-Projektes im Rahmen einer langfristig angelegten Strategie beschließen und mit den dafür notwendigen Ressourcen (Personal, Förderprojekte) versehen.

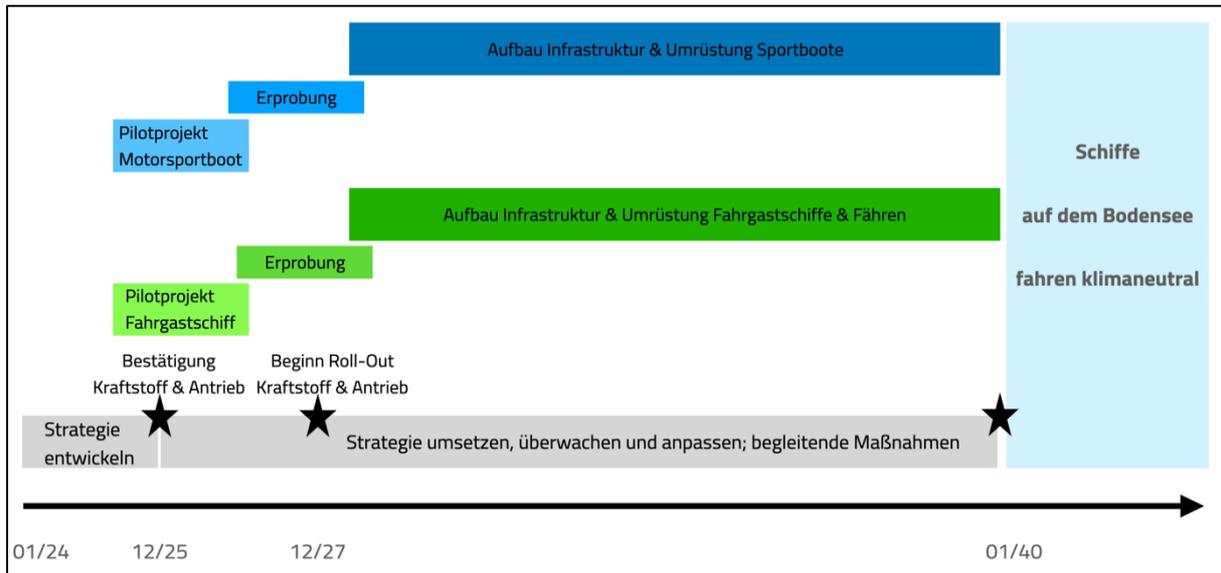


Abbildung 6.1: Internationales Leuchtturmprojekt „Klimaneutrale Bodensee-Schifffahrt“: Prinzipielle Vorgehensweise

### Leistungsbegrenzung für Sportboote

Über die letzten Jahre sind die Sportboote immer größer und schwerer geworden. Damit einher geht eine sehr hohe Antriebsleistung, um diese Boote in den Gleitmodus zu bekommen. Mehrere hundert kW Leistung sind für solche Boote nicht ungewöhnlich. Im Vergleich dazu reichen beim Solarschiff MS Insel Mainau 2 x 75 kW aus, um bis zu 300 Gäste zu befördern. Die großen Yachten sind für Küstengewässer (z.B. Mittelmeer) entwickelt worden und für den Bodensee vollkommen überdimensioniert. Heute haben die großen Yachten ein Gewicht von bis zu 20 Tonnen und brauchen für die gewünschte Fahrt im Gleit-Modus eine Leistung von mehr als 750 kW (etwa 1.000 PS). Damit einher geht auch eine starke, für die Uferzonen schädliche Wellenbildung. Abbildung 6.2 verdeutlicht den Zusammenhang der CO<sub>2</sub>-Emission mit der Leistung. Knapp 30.000 Boote fallen unter diese Leistungsgrenze von 100 kW. Eine Leistungsbegrenzung für erstmals auf dem Bodensee zugelassene Boote würde den weiteren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen begrenzen und die Entwicklung effizienterer Antriebe und Rumpfformen anstoßen. Mit einer Leistungsbegrenzung auf 100 kW können Gleiter bis 2 Tonnen und Verdränger bis 20 Tonnen Gewicht betrieben werden. Das

wäre auch ein wichtiges Signal, um die angestrebte Klimaneutralität 2040 zu untermauern. Die Entscheidung über die Einführung von Zulassungsbeschränkungen auf Basis der Fortschritte des Leuchtturmprojektes sollte bis 12/2025 getroffen werden. Optional ist auch eine Beschränkung der Größe (Gewicht, Breite, Länge) der Yachten (Gleiter) denkbar.

Mögliche Maßnahmen:

Die Erstzulassung von Booten für den Bodensee auf eine Leistung von 100 kW begrenzen.

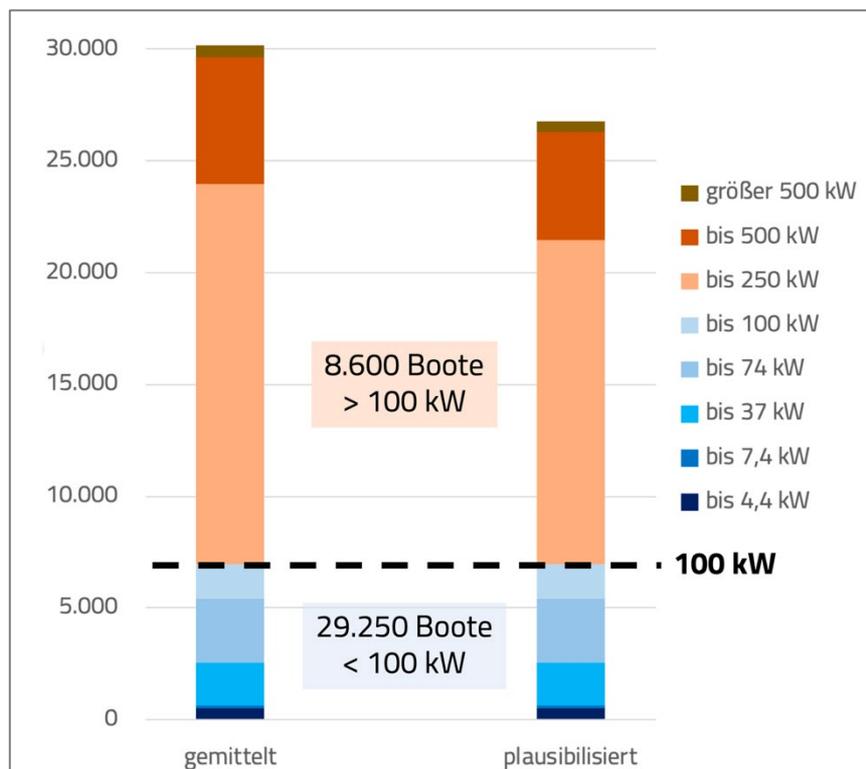


Abbildung 6.2: Jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen in Tonnen aller Vergnügungsfahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Segelboote und Motorsportboote) aufgeteilt nach Leistungsklassen im Szenario „gemittelt“ (siehe Anlage 8.6) und „plausibilisiert“

### Neuanschaffung von Fähren und Fahrgastschiffen

Bei der Neuanschaffung von Fähren und Fahrgastschiffen sollten nur noch (potentiell) klimaneutrale Antriebe zum Einsatz kommen. Wie in Abbildung 4.17 gezeigt, sind Methanoltaugliche Motoren für diese Schiffe in den nächsten Jahren verfügbar. Bis zur breiten Verfügbarkeit

von E-Methanol könnten diese Motoren auch noch vorübergehend mit Diesel oder fossilem Methanol betrieben werden. Auch HVO als etwas klima- und emissionsfreundlicherer Dieselerersatz wäre denkbar (siehe dazu Kapitel 4.1). Die Aktivität wäre Teil des Leuchtturm-Projektes „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“ und sollte entsprechend gefördert werden. Die BSB haben bereits beschlossen, keine klassischen Diesel-Motoren mehr zu beschaffen.

Mögliche Maßnahmen:

Bei Neuanschaffung von Fähren und Fahrgastschiffen kommen nur noch Antriebe zum Zuge, die mit klimaneutralen Kraftstoffen (E-Methanol) betrieben werden können.

### **Emissionsgrenzwerte für alle Sportboote angleichen**

Heute gibt es eine Reihe von Ausnahmeregelungen für die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach der BSO 2 bei Benzin-Motoren im Leistungsbereich bis 150 PS. Dies hat zur Folge, dass diese Motoren deutlich höhere Emissionen an Kohlenwasserstoffen und damit verbunden höhere spezifische Verbräuche haben. Technisch gibt es keine Gründe für die Ausnahmeregelung – jeder PKW mit Benzin-Motor hat seit Jahrzehnten 3-Wege-Katalysatoren eingebaut. Allerdings gibt es kaum Hersteller, die entsprechende Bootsmotoren in dieser Leistungsklasse anbieten. Die Vorschriften der BSO könnten dahingehend geändert werden, dass für alle Benzin-Motoren ohne Ausnahmen 3-Wege-Katalysatoren vorgeschrieben werden. Allerdings müsste den Herstellern die Zeit für die Anpassung ihrer Motoren gegeben werden.

Mögliche Maßnahmen

Aufhebung der Außerkraftsetzung der in der BSO 2 geforderten Emissionsgrenzwerte für die Erstzulassung von Benzin-Motoren im unteren Leistungsbereich.

Die bisher aufgezeigten, möglichen Maßnahmen beziehen sich auf Neuzulassungen, helfen aber nicht bei der Reduktion der Emissionen der Bestandsflotte, wie in der schematischen Darstellung in den Abbildungen 6.3 und 6.4 ersichtlich ist.

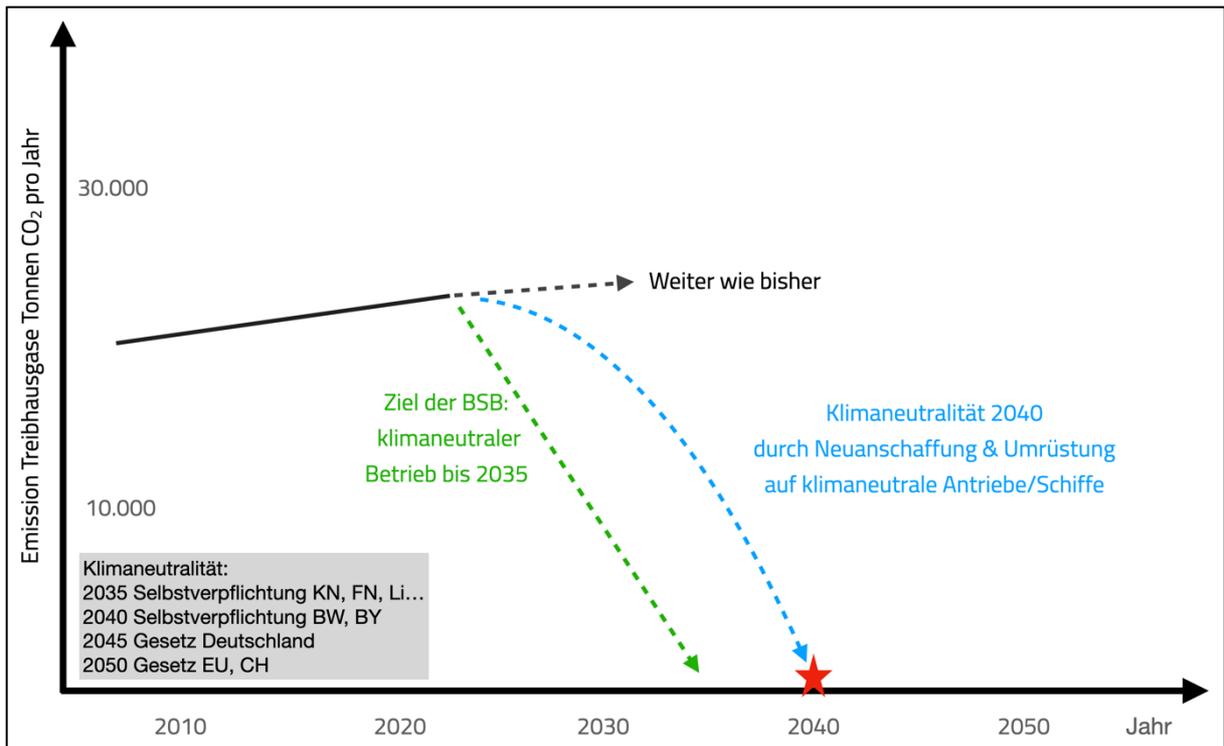


Abbildung 6.3: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Berufsschifffahrt seit 2010 und Pfad zur Klimaneutralität 2040 (schematische Darstellung)

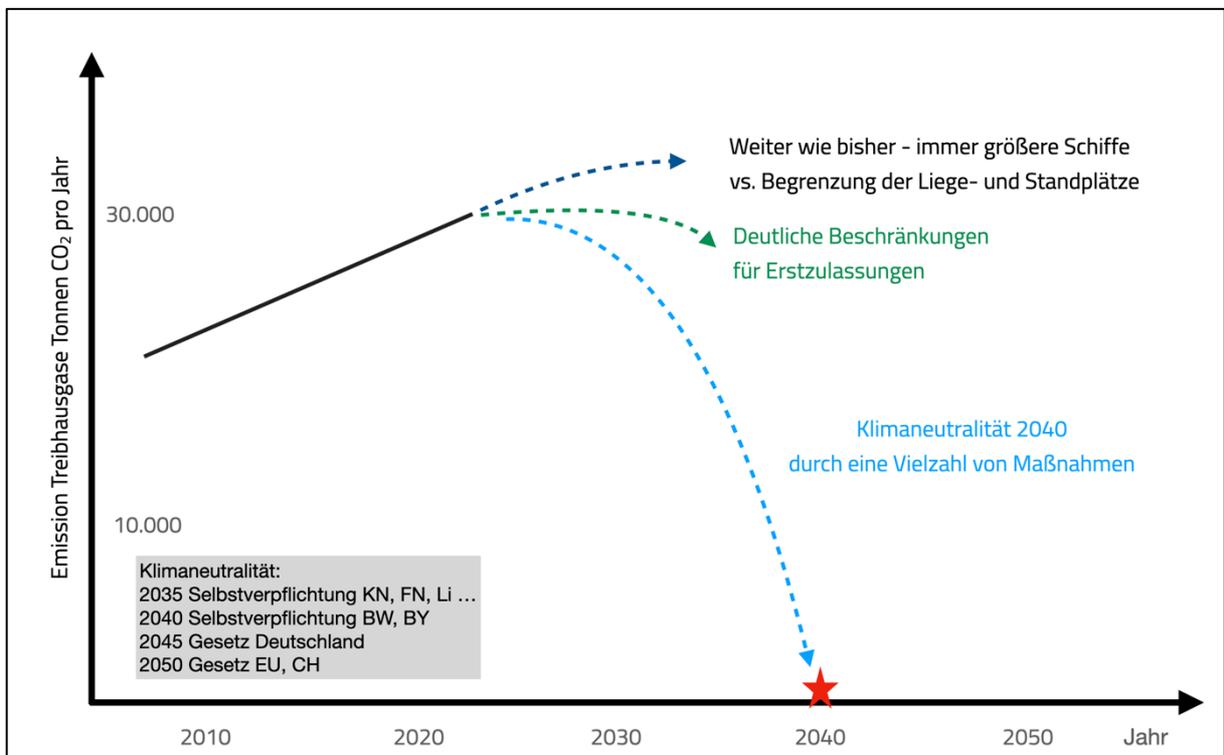


Abbildung 6.4: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Sportboote seit 2010 und Pfad zur Klimaneutralität 2040 (schematische Darstellung)

Um die heutigen und aller Wahrscheinlichkeit nach noch sehr lange weiter betreibbaren Boote zu erhalten – was im Sinne einer ganzheitlichen Ökobilanz sogar vernünftig sein kann – sollte es eine Motivation zur Umrüstung auf klimafreundliche und emissionsarme Antriebe geben. Zum Einstieg in die möglichen Maßnahmen ist zunächst ein kurzer Blick zurück wichtig. Wie entstand die heutige Situation?

### **Den Wandel aktiv gestalten**

„Das Design der heutigen Schiffe basiert seit 100 Jahren auf billigem Diesel-Kraftstoff“. Dieses Zitat von Herrn Witte, BSB, auf dem Stakeholder-Treffen Berufsschiffahrt gibt einen wichtigen Hinweis auf moderne Schiffs- und Antriebskonstruktionen, die sehr viel sparsamer mit Kraftstoff umgehen als es traditionell der Fall ist. Idealerweise werden durch optimierte Konstruktionen auch Wellenbildung und Lärmemission reduziert.

Vor etwa 50 Jahren ermöglichten leichte Schiffsrümpfe aus Glasfaser-verstärktem Kunststoff (GFK) in Verbindung mit immer leistungsfähigeren Motoren, immer größere und luxuriösere Sportboote als schnelle Gleiter zu entwickeln. Diese Yachten mit hohem Symbol-Gehalt verbreiteten sich zunächst in den glamourösen Badeorten im Mittelmeer, hielten aber auch zunehmend Einzug in Binnengewässer wie den Bodensee. Der rasante Anstieg um 4.137 Boote mit hoher Leistung in den letzten 12 Jahren, verbunden mit dem Trend zu immer größeren Booten am Bodensee zeigen die Zulassungsstatistik (Kapitel 3) wie auch die schnell zunehmenden CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abbildung 6.4). Allerdings liegen diese Boote in den Sommermonaten zu 90 Prozent der Zeit am Liegeplatz und werden oft nur an wenigen Tagen im Jahr für einen Badeausflug in die begehrten Badebuchten rund um den See benutzt.

Zunächst ist es wichtig, dass sich alle Akteure dieser Zusammenhänge bewusst werden. Wie die Stakeholder-Analysen in Kapitel 5 gezeigt haben, gibt es hier erste Fortschritte. Eine intensivere Kommunikation der Zusammenhänge und Fakten ist für den Transformationsprozess sehr hilfreich.

Für kleinere und langsam fahrende Sportboote sowie Segelboote sind inzwischen batterieelektrische Antriebe verfügbar. Eine einfache elektrische Infrastruktur (bis ca. 3kW Ladeleistung) in den Häfen würde zu einer Umrüstung auf elektrische Antriebe motivieren.

### **Umrüstung auf klimafreundliche Antriebe**

Aufgrund der hohen Lebensdauer vieler Schiffe ist die Umrüstung auf klimaneutrale Antriebe ein sehr wichtiger Teil des Transformationsprozesses. Gerade für Antriebe auf der Basis von Verbrennungsmotoren erscheint ein Wechsel auf E-Methanol-taugliche Motoren als die sinnvollste

Variante. Durch Dual-Fuel-Motoren mit Diesel / Methanol für Fähren und Fahrgastschiffe bzw. mit Benzin / Methanol für Sportboote kann der Aufbau der Infrastruktur von der Umrüstung der Schiffe entkoppelt werden. Aufgrund der sehr hohen Lebensdauer bedarf es politischer Instrumente, um die Umrüstung von heutigen, oft stark veralteten Antrieben auf klimaneutrale Lösungen voranzutreiben. Einhergehend mit der Kraftstoff- und Antriebsstrategie (siehe Abbildung 6.1) werden über Pilotprojekte erste Schiffe umgerüstet und sowohl Kraftstoffbeschaffung als auch Betankungsinfrastruktur getestet. Entsprechende (Förder)-Instrumente für die breite Umsetzung ab 2028 werden entwickelt. Die Finanzierung erfolgt über die Einnahmen aus den Gebühren für die Nutzung des Sees (siehe unten). Die Fördersummen hängen von der Höhe der eingenommenen Gebühren ab und sollten deutlich degressiv gestaltet werden, um die Umsetzung zu beschleunigen

Mögliche Maßnahmen:

Umrüstung bestehender Schiffe auf klimafreundliche Antriebe und Erprobung der neuen Technologien und Kraftstoffe in Pilotprojekten, sowie Entwicklung von Fördermaßnahme, um die breite Umsetzung voranzutreiben.

### **Reduzierte Geschwindigkeiten**

Eine Reduzierung der Geschwindigkeit geht einher mit einer deutlichen Reduzierung des Kraftstoffbedarfes – das kennen wir vom Straßenverkehr und gilt auch für die Schifffahrt. Bei schnellen Sportbooten, den Gleitern, ist dieser Zusammenhang aus physikalischen Gründen extrem hoch (siehe Abbildung 3.3). Beim Wasserskifahren oder noch sehr viel stärker beim Erzeugen von Wellen für das Wake Boarden werden die Verbräuche nochmals deutlich höher. Eine Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit auf die Rumpfgeschwindigkeit (ca. 12 km/h) würde den Verbrauch (pro Stunde Betriebszeit) bei den Sportbooten um 75 Prozent reduzieren (siehe Abbildung 6.5). Eine Reduzierung auf höhere Geschwindigkeiten (z.B. 25 km/h) bringt nur relativ wenig Kraftstoffeinsparung und ist mit einem instabilen Fahrverhalten verbunden. Mit der Reduzierung der Geschwindigkeit geht auch eine deutliche Reduktion der Wellenbildung und der Schallemissionen einher. Auch die Emission von Schadstoffen (Kohlenwasserstoffe) geht stark zurück. Aus Sicht der Ökologen wäre das alles mehr als begrüßenswert. Für die heutigen Sportboot-Besitzer würde der gewünschte „Spaßfaktor des schnellen Fahrens“ wegfallen, Wasserskifahren nicht mehr möglich sein und der Zeitbedarf für längere Strecken deutlich höher ausfallen. Es ist zu erwarten, dass in diesem Fall die großen Sportboote vom Bodensee verschwinden, einhergehend mit entsprechenden wirtschaftlichen Konsequenzen für Händler, Werften und Betreiber von Tankstellen.

Über die Einführung von Geschwindigkeitsbegrenzungen sollte auf der Basis der Fortschritte des Leuchtturmprojektes bis 12/2025 entschieden werden.

### Mögliche Maßnahmen

Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit für Vergnügungsfahrzeuge auf dem Bodensee auf 12 km/h.

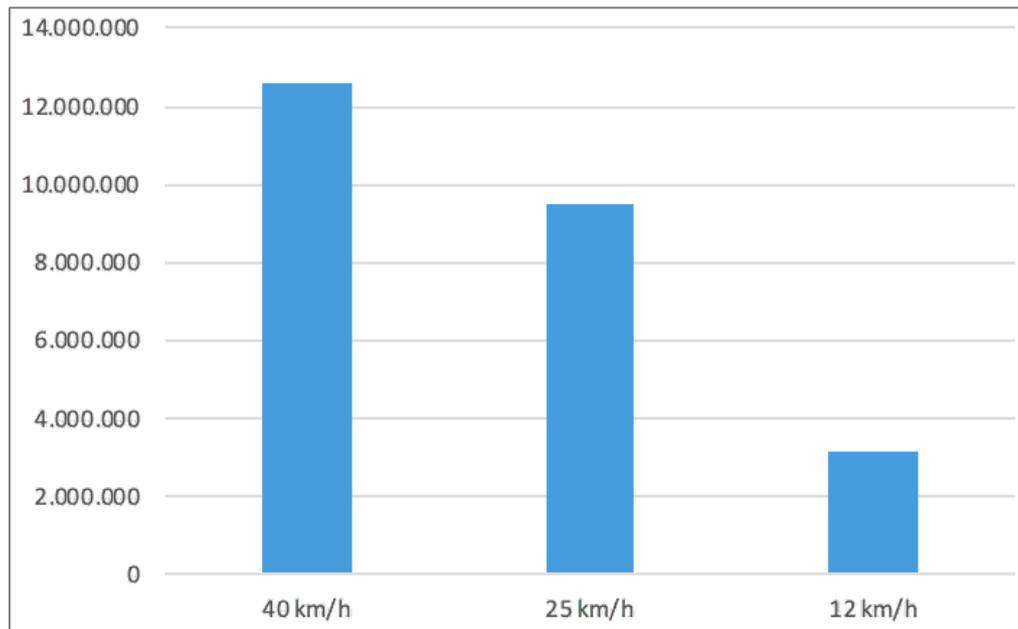


Abbildung 6.5: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs (Liter/Jahr) und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Sportbooten bei einer Begrenzung der Geschwindigkeit auf 25 km/h um 25% und bei 12 km/h um 75%

### Gebühren für die Nutzung des Sees und der Liegeplätze

Anders als im Straßenverkehr gibt es für die Nutzung des Bodensees nur in der Schweiz Gebühren (etwa 7,20 CHF pro kW und Jahr, nicht zweckgebunden). Deutschland und Österreich erheben keine Steuern. Mit solchen jährlichen Gebühren für die Nutzung des Bodensees mit Schiffen könnte eine deutliche steuernde Wirkung für die Umrüstung auf emissionsarme Antriebe erzielt werden. Da es keine Regelwerke zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Schiffen gibt, könnte eine Staffelung nach Leistung der Antriebe, Bootstyp (Gleiter) und Abgastypisierung herangezogen werden. Klimaneutrale Antriebe wären dann von der Abgabe befreit. Kleine Sportboote (z.B. < 37 kW) sollten nur eine moderate Abgabe zahlen müssen, um den Breitensport nicht zu beeinträchtigen. Würde die jährliche Gebühr im Durchschnitt über alle Leistungs- und Abgasklassen zum Beispiel 1.000 Euro

betragen (angelehnt an die Gebühren in der Schweiz), würde dies beispielsweise für das Landratsamt Bodenseekreis Einnahmen von etwa 5 Millionen Euro bedeuten, die dann für Fördermaßnahmen im Sinne einer klimaneutralen Bodensee-Schifffahrt eingesetzt werden könnten. Bei einer Förderquote von 50 Prozent würde das jährliche Budget für Projekte zur klimaneutralen Schifffahrt in diesem Landkreis 10 Millionen Euro betragen.

Bei einer 6 Tonnen-Yacht belaufen sich in der Schweiz die Gebühren heute auf etwa 3.000 CHF. Im Vergleich zu den Gesamtkosten für den Unterhalt der Yacht von rund 20.000 Euro erscheint das vertretbar. Die Einführung dieser Gebühren sollte zügig erfolgen (ab 2026), um die Mittel für die Förderinstrumente zu generieren. Die Gebührenerhebung und Mittelverwendung könnten, soweit möglich, dezentral organisiert werden (Kantone, Länder, Landratsämter). Die thematische Abstimmung erfolgt dann über die etablierten Gremien der IBK und ISKB.

Auch bei den Liegeplätzen könnte eine analoge, nach Emissionsverhalten gestaffelte Gebühr eine Motivation für den Wechsel zu klimafreundlichen Antrieben sein. Optional ist auch eine Beschränkung der Größe (Gewicht, Breite, Länge) der Yachten bei der Vergabe von Liegeplätzen denkbar. In der Vergangenheit wurden häufig drei Liegeplätze in zwei größere, attraktiv bezahlte Liegeplätze umgewandelt. Dieser Trend sollte umgekehrt werden. Für die Häfen in privater Hand wäre eine freiwillige Selbstverpflichtung zur Umsetzung der beiden Maßnahmen denkbar.

In der Berufsschifffahrt auf dem Bodensee sind die heutigen fossilen Kraftstoffe von der Steuer befreit. Insofern entfällt derzeit die Steuerungsmöglichkeit, wie sie im Verkehrssektor für klimafreundliche Antriebe zum Einsatz kommt. In der Schweiz läuft diese Regelung 2025 aus (39). Damit könnten sich dann auch neue Instrumente für die Umsetzung zu einer klimafreundlichen Schifffahrt ergeben.

#### Mögliche Maßnahmen

Die verantwortlichen Organisationen sollten die detaillierte Ausgestaltung dieser Gebühren bzw. Steuern und deren Verwendung prüfen. Bei privaten Hafenbetreibern könnten die Maßnahmen über eine freiwillige Selbstverpflichtung umgesetzt werden.

## **Kosten der Maßnahmen**

Die Kosten des gesamten Transformationsprozesses lassen sich heute nicht seriös abschätzen. Zukünftige Kraftstoffe und Antriebstechnologien werden erst mit einer breiten Industrialisierung und Markteinführung Kostenniveaus erreichen, wie wir sie im heutigen, fossilen System haben – das bekannte Henne-Ei-Dilemma, das für alle grundlegend neuen Technologien gilt.

Die Frage nach den Kosten bei den Batterie-elektrischen Antrieben und der dafür notwendigen Ladeinfrastruktur für leistungsstarke Sportboote (Gleiter) stellt sich eigentlich nicht, da diese Technologie nicht sinnvoll realisierbar ist (Kapitel 4.2). Beispielhaft soll hier nur erwähnt werden, dass eine Schnellladesäule für eine Ladeleistung von 150 kW aktuell für etwa 60.000 € angeboten wird (Beispiel Alpitronic). Dazu kommen noch die Kosten für den Stromanschluss, die stark von den örtlichen Randbedingungen abhängen. Würde man mehrere solcher Schnellladesäulen installieren, bedarf es eines Mittelspannungsanschlusses, der je nach Entfernung zur nächsten Mittelspannungsleitung mehrere hunderttausend Euro kosten kann. Inzwischen gibt es auch Ladesäulen mit integriertem Batteriespeicher, um die hohen Kosten für den Netzanschluss zu vermeiden. Solche Batterie-gepufferten Ladesäulen kosten etwa 150.000 €. Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit braucht der Betreiber in einem ersten Schritt nur die erwarteten verkauften Strommengen abschätzen und mit den Investitionskosten abgleichen. Bei dem saisonalen und auf Wochenenden fokussierten Betrieb in den Häfen für Sportboote lässt sich schnell erkennen, dass der Ladestrom extrem teuer verkauft werden müsste, um die Investition zu rechtfertigen.

Bei einer Ladestation für Fähren, die ganzjährig im Einsatz sind und mehrmals täglich geladen werden, amortisieren sich die Investitionen dagegen relativ schnell. Hier wird die Verfügbarkeit von kostengünstigem und CO<sub>2</sub>-freiem Strom entscheidend sein. Eine konkrete Berechnung kann nur sehr spezifisch für den jeweiligen Anwendungsfall erfolgen.

Eine einfache, 220 Volt Infrastruktur besteht in vielen Häfen bereits für die Versorgung der Schiffe mit Bordstrom. Diese Infrastruktur kann auch zum langsamen Laden kleiner Batterien genutzt werden. Die Kosten für die neue Errichtung so einer Infrastruktur sind überschaubar und können, falls erforderlich und sinnvoll, vom Hafенbetreiber getragen werden.

Bei E-Methanol werden die Kosten bei großtechnischer Produktion zwischen 50 und 100 €/MWh liegen (siehe auch Kapitel 4.1 und Abbildung 4.7). Im Vergleich zum Rohöl-Preis (heute bei etwa 50 \$ MWh) und den dazukommenden Kosten für die Raffination plus dem CO<sub>2</sub>-Preis, ist das dann ein

wettbewerbsfähiges Niveau (siehe Abbildung 6.6; 1 GJ = 0,28 MWh; 1 t Methanol hat 5,5 MWh Energieinhalt). Durch effiziente Motoren, Antriebstechnologien und optimierte Rumpfformen lassen sich die Betriebskosten sogar reduzieren. Da sich Methanol-Motoren kaum von heutigen Motoren unterscheiden, sind langfristig keine höhere Preise zu erwarten. In der frühen Phase sind allerdings Investitionszuschüsse notwendig, um die Mehrkosten aufgrund der geringen produzierten Stückzahlen aufzufangen (39).

Häufig wird argumentiert, dass E-Fuels viel zu teuer sind und Strom aus Erneuerbaren Quellen sehr viel günstiger ist. Vergleicht man die oben genannten 5 bis 10 ct/kWh für E-Methanol mit den Stromgestehungskosten in Abbildung 6.7, dann zeigt sich, dass E-Methanol im gleichen Kostenbereich liegt wie Strom aus Sonne und Wind in Deutschland. Das liegt daran, dass E-Methanol in Regionen mit sehr viel mehr Sonne und Wind wesentlich kostengünstiger erzeugt werden kann als in Deutschland. Dazu kommt, dass direkte Nutzung von Strom aus Sonne und Wind vor Ort zeitlich stark eingeschränkt ist (siehe Abbildungen 4.11 und 4.12). Kommt der Strom in Zeiten von zu wenig Strom aus Sonne und Wind aus Erdgaskraftwerken (künftig mit Wasserstoff betrieben), dann ist dieser aufgrund des geringen Wirkungsgrades der Gasturbinen deutlich teurer als E-Methanol (bis zu 30 ct/kWh).

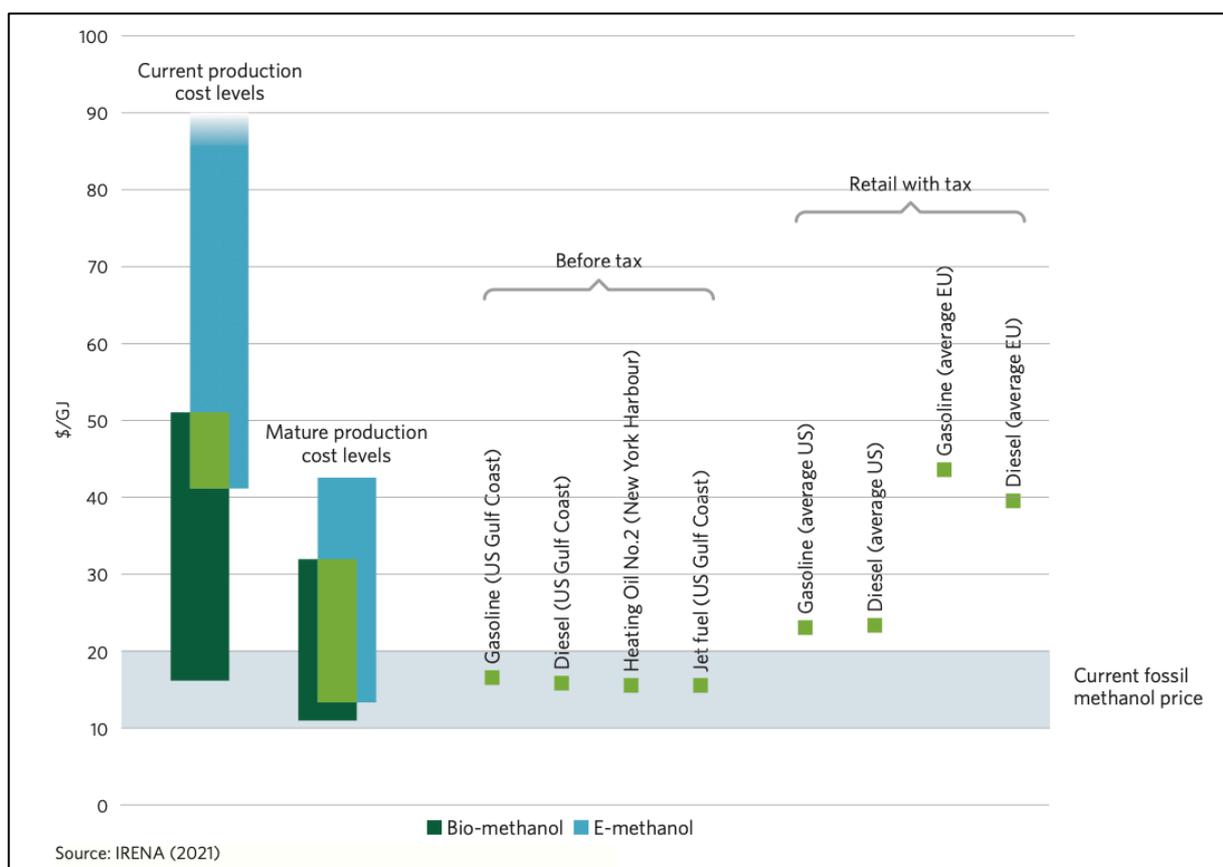


Abbildung 6.6: Vergleich der heutigen Kosten fossiler Kraftstoffe und künftigen Kosten für E-Methanol (37)

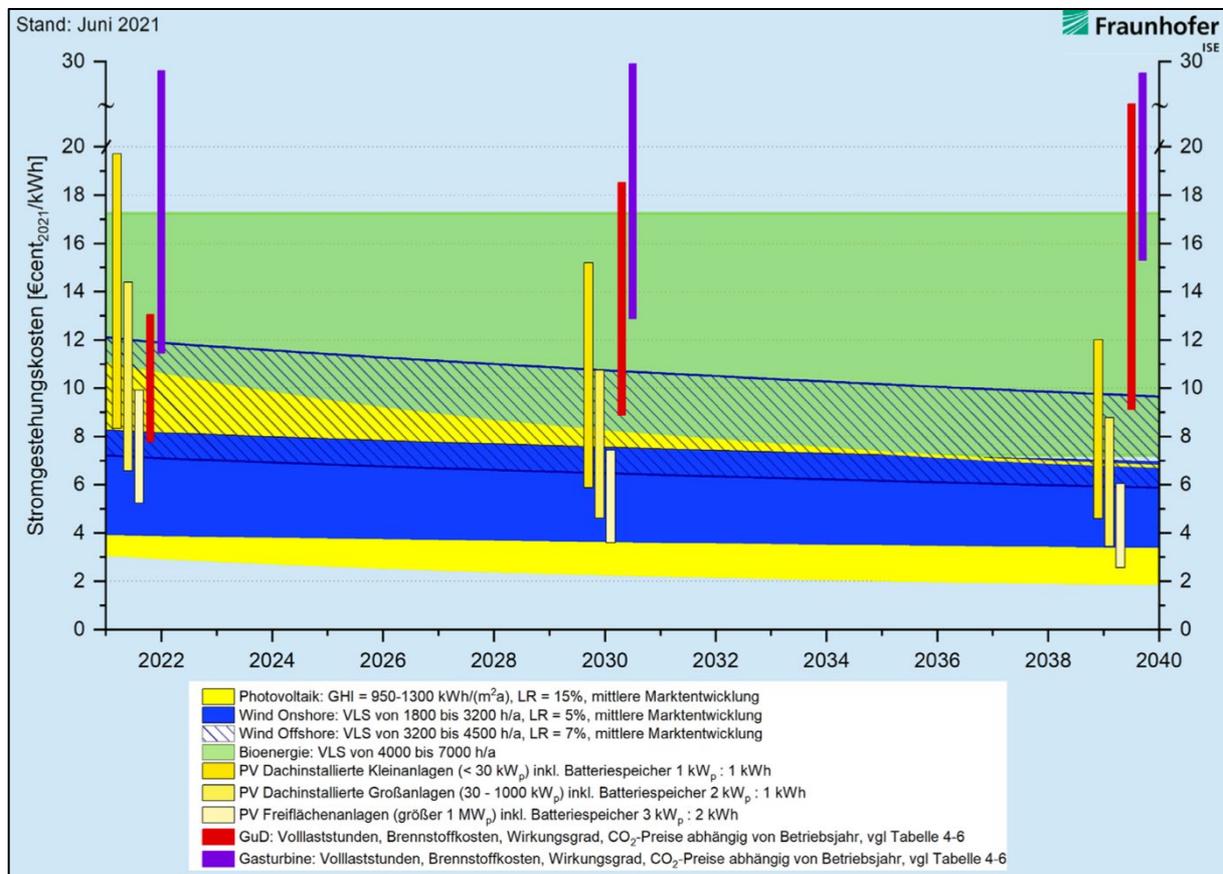


Abbildung 6.7: Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien und konventionellen Kraftwerken 2021 und lernkurvenbasierte Prognose bis 2040 (44)

Durch entsprechende, gut geplante regulatorische Maßnahmen können die finanziellen Auswirkungen der Umstellung für die öffentliche Hand auf einem akzeptablen Niveau gehalten werden. Voraussetzung sind allerdings eindeutige und stabile Rahmenbedingungen für den Transformationsprozess.

Durch die Einführung von emissionsabhängigen Gebühren für die Nutzung des Sees und der Liegeplätze können erhebliche Mittel für die notwendigen Fördermaßnahmen bereitgestellt werden. Darüber hinaus können durch stabile regulatorische Maßnahmen erheblich private Investitionen freigesetzt werden.

Im Rahmen anstehender Revisionen der Fahrgastschiffe/Fähren kann die Umrüstung auf Methanol-Antriebe durchgeführt werden. Dabei sollte eine Förderung der Zusatzkosten (im Vergleich zu Diesel) für Antriebe und Tankstellen erfolgen. Diese Kosten können erst in der nächsten Phase durch eine detaillierte Planung und konkrete Angebote von Lieferanten ermittelt werden.

Eine finanzielle Förderung der Werften, Hafen- und Tankstellenbetreiber zur Entwicklung der notwendigen Kompetenzen und Infrastruktur für die Umrüstung ist anzustreben. Diese Kosten können erst in der nächsten Phase unter Einbeziehung aller Akteure und Festlegung der Antriebsstrategie ermittelt werden.

Umfangreiche nationale und internationale Förderprogramme zu klimaneutralen Antrieben, auch für den maritimen Bereich, sind teilweise vorhanden. Eine zusätzliche Unterstützung durch die Bodensee-Anrainer-Staaten über deutliche politische Signale an die nationalen Regierungen und an die EU wären mehr als hilfreich. Zur Aktivierung des essenziellen privaten Kapitals tragen klare politische Rahmenbedingungen bei.

Die Fragestellung zum Zusammenhang zwischen Wellenbildung, Schiffsdesign, Antriebstechnologie und Geschwindigkeit sollte durch das Seenforschungsinstitut mit entsprechenden Kooperationspartnern beantwortet werden.

Idealerweise werden die vorgenannten Themen unter Einbindung der wichtigsten Akteure aus der Bodenseeregion zu einem Leuchtturm-Projekt „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“ gebündelt. Dies geht einher mit der zu Beginn des Kapitels genannten Ausarbeitung einer gemeinsamen Strategie. Die für den Start der Aktivitäten erforderlichen Ressourcen können nach der grundsätzlichen Zustimmung zur Vorgehensweise und Festlegung der wesentlichen Inhalte relativ einfach ermittelt werden.

## 7. Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise

Mit der vorliegenden Studie wurde erstmals ein ganzheitlicher Überblick zur Bodenseeschifffahrt unter dem Aspekt der angestrebten Klimaneutralität geschaffen. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Motorsportboote mit hoher Leistung (> 37 kW), Fähren und Fahrgastschiffe sind für etwa 90 Prozent des Kraftstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Auf diese drei Kategorien sollten sich die künftigen Maßnahmen fokussieren.
- Unter Beibehaltung der heutigen Fahrprofile (Geschwindigkeit, Entfernungen) ist die Klimaneutralität für die meisten Boote nur langfristig (bis 2040) mit flüssigen, CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen, bevorzugt E-Methanol, erreichbar. Dies ist auch die bevorzugte Lösung für die so wichtige Umrüstung der Bestandsflotte.
- Batterie-elektrische Antriebe sind nur für kurze Strecken und langsames Fahren sinnvoll. Aufgrund des hohen Energiebedarfs für lange Fahrstrecken oder schnelles Fahren sind rein batterie-elektrische Antriebe nicht zielführend. Eine für das bedarfsgerechte Laden der Batterien ausreichende Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-freiem Strom und die extrem teure Infrastruktur für hohe Ladeleistungen sind weitere Hürden. Für langsam fahrende Vergnügungsboote sind erste batterie-elektrische Antriebe verfügbar. Eine einfache Ladeinfrastruktur (2 kW Ladeleistung) in den Häfen ist für diese Antriebe wichtig.
- Elektro-Antriebe mit Brennstoffzelle und Wasserstoff sind für neue, größere Schiffe (Fähren) eine gute Option, erfordern allerdings lokal erzeugten oder importierten grünen Wasserstoff.

Entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung sind Maßnahmen, die eine hohe Akzeptanz bei einem Großteil aller Interessensgruppen genießen und konsequent umgesetzt werden. Aus den in Kapitel 6 erläuterten Maßnahmen werden von den Autoren der Studie diejenigen empfohlen und als Gesamtpaket empfohlen, die auf die Innovationskraft der Bodenseeregion setzen und möglichst wenig harte Einschränkungen nach sich ziehen.

Die wichtigste und übergeordnete Maßnahme ist die verbindliche Festlegung eines Datums, ab dem die Bodenseeschifffahrt klimaneutral sein soll. In der Gipfelerklärung 2022 der Regierungschefs wurde für die Bodensee-Region vereinbart:

*'Wir setzen auf eine klimaneutrale Verkehrszukunft um den See und auf ihm. Ökologische und vernetzte Mobilität ist das Gebot der Stunde. Die Transformation soll möglichst schnell gelingen.'*

Die Autoren der Studie schlagen vor:

**Die Klimaneutralität für die Schifffahrt auf dem Bodensee ist für das Jahr 2040 anzustreben und nach der Verifikation der bevorzugten Technologie in etwa vier Jahren verbindlich festzulegen.**

Die verbleibenden 16 Jahre sind ein sinnvoller, aber auch notwendiger Zeitraum, um die Transformation sicher zu gestalten. Der Start für diesen äußerst anspruchsvollen Prozess muss allerdings sofort erfolgen und sollte sich auf die drei Kategorien fokussieren, die für den allergrößten Teil der Emissionen verantwortlich sind. Die Umrüstung der Bestandsflotte spielt eine entscheidende Rolle für das Erreichen des Ziels.

Diese Maßnahme sollte kurzfristig beschlossen und kommuniziert werden. Damit wird für alle Akteure die notwendige Planungssicherheit mit der erforderlichen Vorlaufzeit von 16 Jahren geschaffen.

Eine Vielzahl weiterer unterstützender Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität 2040 ist notwendig und sollte im Grundsatz beschlossen werden. Eine detaillierte Ausarbeitung der im Folgenden aufgeführten Maßnahmen ist in den kommenden Monaten durch die verantwortlichen Organisationen erforderlich. Dazu gehören:

Etablierung und Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen für ein internationales Leuchtturm-Projekt „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“, über das eine gemeinsame Strategie zu Kraftstoffen und Antrieben der Zukunft entwickelt und umgesetzt wird. Pilotprojekte zu Fahrgastschiffen, Sportbooten und der dazugehörigen Kraftstoffinfrastruktur sowie eine Vielzahl weiterer Maßnahmen bereiten eine breite Umsetzung der klimaneutralen Schifffahrt ab 2028 vor.

Regulatorische Maßnahmen zur Erstzulassung von Schiffen auf dem Bodensee:

- Bei Neuanschaffungen von Fahrgastschiffen und Fähren kommen nur noch Motoren zum Einsatz, die mit klimaneutralen Kraftstoffen (E-Methanol) betrieben werden können.
- Weitere Anpassung der BSO zur Beschleunigung des Transformationsprozesses, z.B. Zulassung von Methanol als Kraftstoff auf dem Bodensee.

Regulatorische Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen der Bestandsflotte:

- Entwicklung von (Förder)-Instrumenten um die Nach- und Umrüstung alter Antriebstechnologien auf klimaneutrale Lösungen voranzutreiben.
- Zügige Einführung einer leistungs- und emissionsabhängigen Gebühr für die Nutzung des Bodensees und Verwendung der Einnahmen für Fördermaßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität (Leuchtturmprojekt „Klimaneutraler Bodensee“).
- Soweit möglich könnten die Gebühren für Liegeplätze ebenfalls leistungs- und emissionsabhängig sein. Die Einnahmen sollen gezielt für Fördermaßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität eingesetzt werden.
- Die Vergabe von Liegeplätzen an Yachten, die eine bestimmte Größe überschreiten, sollte beendet werden.
- Mit privaten Hafengebietern sollten die vorgenannten Maßnahmen über eine freiwillige Selbstverpflichtung vereinbart werden.

Über die Notwendigkeit von Geschwindigkeitsbegrenzungen, Leistungsbegrenzungen und weiteren Maßnahmen sollte in Abhängigkeit der Fortschritte im Leuchtturmprojekt „Klimaneutrale Bodenseeschifffahrt“ bis 12/2025 entschieden werden.

## 8. Anhang

### 8.1 Quellen und Literaturverzeichnis

- (1) Bodensee-Schiffahrtsstatistik: <https://vorarlberg.at/-/schiffahrt>.
- (2) KBA: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2021/2021\\_b\\_kurzbericht\\_fz\\_alter\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2#:~:text=DasProzent20durchschnittlicheProzent20AlterProzent20derProzent20zugelassenen,Prozent3AProzent2018Prozent2C4Prozent3BProzent201](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2021/2021_b_kurzbericht_fz_alter_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2#:~:text=DasProzent20durchschnittlicheProzent20AlterProzent20derProzent20zugelassenen,Prozent3AProzent2018Prozent2C4Prozent3BProzent201)
- (3) BSO Anlage C: [https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBodSchO-ANL\\_3](https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBodSchO-ANL_3)
- (4) EU-Sportboot-Richtlinie: ...([https://gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/documents/20121/52051/1\\_1\\_06.pdf](https://gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/documents/20121/52051/1_1_06.pdf)).
- (5) Primärenergieverbrauch Deutschland: <https://www.solarserver.de/2022/12/20/energie-mix-deutschland-2022-erneuerbare-verbrauch-emissionen/>
- (6) BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2022
- (7) Energie in Österreich, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023
- (8) CO<sub>2</sub>-Intensität deutscher Strom: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in#:~:text=DieProzent20ErzeugungProzent20einerProzent20KilowattstundeProzent20OStrom,beiProzent20369Prozent20GrammProzent20proProzent20Kilowattstunde>.
- (9) Electricity Maps: [https://app.electricitymaps.com/zone/DE?wind=false&solar=false&fbclid=IwAROCPB\\_LhIKr8whl4mhRXzz6VHzLC9z70R3S5XoFuBOQISmrAgqGnVuDiRA](https://app.electricitymaps.com/zone/DE?wind=false&solar=false&fbclid=IwAROCPB_LhIKr8whl4mhRXzz6VHzLC9z70R3S5XoFuBOQISmrAgqGnVuDiRA)
- (10) DWD, Sonnenscheindauer: [https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2023/1/14.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2023/1/14.html)
- (11) European Hydrogen Backbone: <https://ehb.eu>
- (12) Renewable Methanol: <https://www.methanol.org/renewable/>
- (13) Obrist Technologies : <https://www.obrist.at/technologies/>
- (14) Wasserstoffstudie Fraunhofer ISE: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/power-to-x-laenderanalysen.html>
- (15) E-Fuels Saudi Aramco Stellantis: <https://fuelcellsworks.com/news/aramco-and-stellantis-team-up-to-accelerate-decarbonization-with-hydrogen-based-efuels-compatible-in-28-million-european-cars/>

- (16) Concawe Studie E-Fuels: <https://www.concawe.eu/publication/e-fuels-a-techno-economic-assessment-of-european-domestic-production-and-imports-towards-2050/>
- (17) Elektrische Schiffe: <https://www.electrive.net/category/wasser/>
- (18) Biodiesel: <https://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- (19) HVO Kraftstoff: <https://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- (20) BP Statistical Review: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- (21) MS Insel Mainau: <https://www.bsb.de/de/unsere-schiffe/unsere-flotte/ms-insel-mainau>
- (22) E-Yacht von Delphia: <https://www.delphiayachts.com/de>
- (23) Studien Hydrogen Council: <https://hydrogencouncil.com/en/intelligence/>
- (24) Studien Wasserstoff IRENA: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- (25) Studien Wasserstoff IEA: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen#overview>
- (26) Bosch Brennstoffzelle: <https://www.bosch-mobility.com/de/ueber-uns/aktuelle-neuigkeiten/brennstoffzelle/>
- (27) Avia H2-Tankstelle: <https://www.avenergy.ch/de/resultat/2-news/624-osterwalderst-gallen-eroeffnet-avia-wasserstofftankstelle>
- (28) EODev Brennstoffzellen-Yacht: <https://www.eo-dev.com/applications/hynova-40-first-rexh2-commercial-boat>
- (29) Methanol ready ships: <https://rbnenergy.com/were-gonna-make-it-clean-methanol-gains-momentum-as-a-shipping-fuel-of-the-near-future>
- (30) Obrist HyperHybrid:  
[https://www.obrist.at/powertrain/?gclid=CjwKCAjwmbqoBhAgEiwACIjzEBoZluYwmHJy3cwz\\_yBCbie1FHbTcFSscLG0UuJQmBGxquXGptho3BoCC9UQAvD\\_BwE](https://www.obrist.at/powertrain/?gclid=CjwKCAjwmbqoBhAgEiwACIjzEBoZluYwmHJy3cwz_yBCbie1FHbTcFSscLG0UuJQmBGxquXGptho3BoCC9UQAvD_BwE)
- (31) RED 3 Renewable Fuel: [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/07/2023\\_07\\_REDIII\\_fact\\_sheet\\_hydrogen\\_efuels\\_RFNBO.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/07/2023_07_REDIII_fact_sheet_hydrogen_efuels_RFNBO.pdf)
- (32) Projekt SuboLakes: <https://www.subolakes.de/startseite/>
- (33) Seeufer Wellenerosion: <https://kops.uni-konstanz.de/entities/publication/1419f2ff-ceb9-4b7d-90fc-3b244dbe9d70>
- (34) Bordstromversorgung: <https://www.my-efoy.com/efoy-hybrid-power/>
- (35) Range Extender: <https://www.sfc.com/en/sfc-energy-cooperates-with-epropulsion-in-the-field-of-electric-boat-drives/>
- (36) EO Dev Präsentation: [https://h2connect.eco/wp-content/uploads/2022/07/Energy-Observer-Group-Presentation\\_REXH2-1.pdf](https://h2connect.eco/wp-content/uploads/2022/07/Energy-Observer-Group-Presentation_REXH2-1.pdf)
- (37) Renewable Methanol: [https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA\\_Innovation\\_Renewable\\_Methanol\\_2021.pdf](https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf)

- (38) Die Zeit; Zertifikate-Betrug: <https://www.zeit.de/2023/04/co2-zertifikate-betrug-emissionshandel-klimaschutz>
- (39) Postulatsbericht Bundesrat Schweiz vom 1.1.23: Klimaschutzpotential in der Schifffahrt
- (40) Stefan Rahmstorf: <https://twitter.com/rahmstorf/status/1713245765856809446>
- (41) Wernicke, Potential HVO-Kraftstoffe: [https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/11/HVO-Papier\\_final\\_HJW\\_17.9.22\\_update-3.10..pdf](https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/11/HVO-Papier_final_HJW_17.9.22_update-3.10..pdf)
- (42) M. Jasper, Carbon Negative Transportation Fuels: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522000319>
- (43) D.Chatterjee, RRPS: Die maritime Energiewende – Global und am Bodensee; 1. Mainauer Klimadialog 2023
- (44) Stromgestehungskosten erneuerbare Energien, Fraunhofer ISE: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>

## 8.2 Liste der beteiligten Organisationen

Amt für öffentlichen Verkehr, St. Gallen  
Amt für Umwelt Appenzell  
Bayerische Staatskanzlei (Auftraggeber)  
Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Sport und Integration  
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz  
Bezirkshauptmannschaft Bregenz  
Bodensee-Schiffsbetriebe GmbH (BSB)  
Bodensee-Segler-Verband e.V.  
Bodensee-Stiftung  
Bundesverband Wasserstoffwirtschaft e.V. (BVWW)  
Deutscher Motor-Yacht-Verband e.V.  
Denk-Raum Bodensee  
Departement für Justiz und Sicherheit, Kanton Thurgau  
Departement Bau und Volkswirtschaft, Appenzell Außerrhoden  
E-Charta Bodensee  
Eidgenössisches Departement für Umwelt,  
Verkehr, Energie, und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Verkehr BAV  
Institut für Weiterbildung, Wissens- und Technologietransfer (Projekt ECOmaritim)  
Internationale Bodensee-Konferenz (IBK) Geschäftsstelle; Kommission Verkehr; Kommission  
Umwelt  
International Schiffahrtskommission Bodensee (ISKB)  
heurekaLAGO e.V.  
HMF - Mobility GmbH Überlingen  
IG- Gewerbe am See, CH  
Interessenverband gewerbliche Schifffahrt (IVM)  
International Solar Energy Research Center Konstanz e.V.  
Internationale Wassersportgemeinschaft Bodensee e.V. (IWGB)  
Landratsamt Bodenseekreis, Amt für Bürgerservice, Schifffahrt und Verkehr  
Landratsamt Konstanz – Referat Klimaschutz  
Landratsamt Konstanz - Amt für Straßenverkehr und Schifffahrt  
Landesanstalt für Umwelt BW, Institut für Seenforschung  
Ministerium für Verkehr, BW  
Rolls Royce Power Solutions, GmbH

Schiffahrtsholding Österreich, Vorarlberg Lines  
Straßenverkehrs- und Schiffahrtsamt, KANTON SCHAFFHAUSEN  
Schweizerische Bodenseeschiffahrt AG (SBS AG)  
Schweizerische Bodenseeschiffahrt Untersee und Rhein  
solarLAGO – smart energy network (Verein in Gründung)  
Verband der Bodenseewerften e.V.  
Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg  
Universität Konstanz, Institut für Limnologie

Dazu kommen viele weitere Organisationen wie Behörden und Ministerien, Fischer und Fischereiverbände, Hafen- und Tankstellenbetreiber und Personen wie Yachtbesitzer, Touristen oder Anwohner, die uns mit hilfreichen Informationen versorgt haben.

### 8.3 Abkürzungen

(wird noch ausgearbeitet)

#### Allgemein

BSB	Bodensee-Schifffahrtsbetriebe GmbH
BSO	Bodensee-Schifffahrtsordnung
BVWW	Bundesverband Wassersportwirtschaft e.V.
FN	Friedrichshafen
IBK	Internationale Bodensee-Konferenz
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
ISKB	Internationale Schifffahrtskommission Bodensee
KN	Konstanz
MENA	Middle East North Africa: Mittlerer Osten und Nord Afrika

#### Technisch

a	annum: Jahr; (z.B. t/a = Tonnen pro Jahr)
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
E-Fuel	Aus Strom (E steht für Elektrisch) erzeugte Kraftstoffe (Fuel)
FAME	Fatty Acid Methyl Ester (Biodiesel)
GW	Gigawatt: Leistung (1 GW = 1 Million kW)
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HVO	Hydrogenated Vegetable Oil: Wasserstoff- mit Wasserstoff behandeltes Pflanzenöl (CO <sub>2</sub> -neutraler Diesel-Ersatz)
h	hora: Zeiteinheit (Stunde)
HC	Hydro Carbon: Kohlenwasserstoffe
ha	Hektar: Fläche (1 ha = 10.000 m <sup>2</sup> )
km/h	Kilometer pro Stunde: Geschwindigkeit
kW	Kilowatt: physikalische Einheit für Leistung (1 kW = 1.000 W = 1,36 PS)
kWh	Kilowattstunde: physikalische Einheit für Energie ( 1kWh = 1.000 Wh = 3.600 kJ)

LCA	Life Cycle Assessment: Ökobilanz
NMHC	Non Methane Hydro Carbons: Messmethode für Motoren-Abgase
RFNBO	Renewable Fuels of Non Biological Origin: Erneuerbare Kraftstoffe, die nicht auf Biomasse beruhen
t	Tonnen: Gewicht
TWh	Terrawattstunde: 1 TWh = 1 Milliarde Kilowattstunden

## **8.4 Fragenkatalog an Behörden, Verbände und Vereine**

Die folgenden Fragen wurden über die IBK-Geschäftsstelle an die relevanten Behörden, Verbände, Institute und Vereine in der Bodenseeregion gestellt:

1. Gibt es in Ihrem Verantwortungsbereich Daten zu den Verbräuchen in der Schifffahrt und können Sie uns diese mitteilen? Das können auch die jährlichen Abgabemengen an den öffentlichen und privaten Tankstellen für Schiffe (Fähren, Fahrgastschiffe, Behördenboote, Sportboote etc. sein). Bei den Daten wäre auch die Entwicklung des Verbrauches über die letzten Jahre hilfreich. Falls Ihnen keine oder nur teilweise Daten vorliegen, kennen Sie Organisationen, die uns hier weiterhelfen können?
2. Welche Maßnahmen zum Thema klimaneutrale Schifffahrt haben Sie in Ihrem Verantwortungsbereich bereits ergriffen, sind kurzfristig geplant oder sind Ihnen bekannt?
3. Welche Maßnahmen (regulatorisch, organisatorisch, freiwillig, etc.) können Sie sich vorstellen um das Ziel der klimaneutralen Schifffahrt auf dem Bodensee zu erreichen?
4. Gibt es Daten zur Verunreinigung des Wassers und der Sedimente (Hafen, See), die auf Verbrennungsmotoren (Ruß, Öl, Kraftstoffe) und auf Unterwasseranstriche (Antifouling) zurückzuführen sind? Bei den Daten wäre auch die Entwicklung über die letzten Jahre hilfreich. Falls Ihnen keine oder nur teilweise Daten vorliegen, kennen Sie Organisationen, die uns hier weiterhelfen können?
5. Gibt es Erkenntnisse zur Auswirkung des von Sportbooten verursachten Wellenschlages auf die Ufergürtel und auf andere Freizeitaktivitäten wie Schwimmen, Paddeln etc.?

## **8.5 Protokolle**

IBK-intern

## 8.6 Abschätzung Kraftstoffverbräuche Vergnügungsboote (Szenario gemittelt)

Verbrauchserhebung der Vergnügungsfahrzeuge am Bodensee							
Motorboot (gemittelte Betrachtung, da immer durchschnittliche Leistungsannahme je Leistungsklasse)							
5964	Motorboote < 4,4kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 4,4 kW	1,76	Liter	wird beibehalten und nicht gemittelt!
180	Mietboote						
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	0,0528 x 13	0,6864			
	71% Teillast	40% Verbrauch	0,704 x 71	49,984	78,8304 : 100	0,7883	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	1,76 x 16	28,16			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		23,64912	L Jahresverbrauch pro Boot			
5964	Motorboote < 4,4kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		141043	Liter		
6144	inkl. Mietboote			145300	Liter		
539	Motorboote > 4,4 und <7,4kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 5,9 kW	2,36	Liter	
7	Mietboote						
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	0,0708 x 13	0,9204			
	71% Teillast	40% Verbrauch	0,944 x 71	67,024	105,7044 : 100	1,05704	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	2,36 x 16	37,76			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		31,71132	L Jahresverbrauch pro Boot			
539	Motorboote > 4,4 und <7,4kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		17092,4	Liter		
546	inkl. Mietboote			17314,4	Liter		
6142	Motorboote > 7,4 und <37kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 22,2 kW	8,88	Liter	
39	Mietboote						
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	0,2664 x 13	3,4632			
	71% Teillast	40% Verbrauch	3,552 x 71	252,192	397,7352 : 100	3,97735	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	8,88 x 16	142,08			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		119,32056	L Jahresverbrauch pro Boot			
6142	Motorboote > 7,4 und <37kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		732867	Liter		
6181	inkl. Mietboote			737520	Liter		
3821	Motorboote > 37 und < 74kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 55,5 kW	22,2	Liter	
46	Mietboote						
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	0,666 x 13	8,658			
	71% Teillast	40% Verbrauch	8,88 x 71	630,48	994,338 : 100	9,94338	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	22,2 x 16	355,2			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		298,3014	L Jahresverbrauch pro Boot			
3821	Motorboote > 37 und < 74kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		1139810	Liter		
3867	inkl. Mietboote			1153532	Liter		
1358	Motorboote > 74 und < 100kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 87,0 kW	34,8	Liter	
1	Mietboot						
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	1,044 x 13	13,572			
	71% Teillast	40% Verbrauch	13,92 x 71	988,32	1558,692 : 100	15,5869	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	34,8 x 16	556,8			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		467,6076	L Jahresverbrauch pro Boot			
1358	Motorboote > 74 und < 100kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		635011	Liter		
1359	inkl. Mietboote			635479	Liter		
7388	Motorboote > 100 und < 250kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 175 kW	70	Liter	
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	2,1 x 13	27,3			
	71% Teillast	40% Verbrauch	28 x 71	1988	3135,3 : 100	31,353	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	70 x 16	1120			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		940,59	L Jahresverbrauch pro Boot			
7388	Motorboote > 100 und < 250kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		6949079	Liter		
1148	Motorboote > 250 und < 500kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 375 kW	150	Liter	
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	4,5 x 13	58,5			
	71% Teillast	40% Verbrauch	60 x 71	4260	6718,5 : 100	67,185	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	150 x 16	2400			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		2015,55	L Jahresverbrauch pro Boot			
1148	Motorboote > 250 und < 500kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		2313851	Liter		
81	Motorboote > 500 kW Leistung			Verbrauch: 0,41 x 500 kW	200	Liter	
	13 % Leerlauf	3% Verbrauch	6 x 13	78			
	71% Teillast	40% Verbrauch	80 x 71	5680	8958 : 100	89,58	L pro Stunde
	16% Volllast	100% Verbrauch	200 x 16	3200			
	Motorboote Jahresmotorstunden: 30 h =		2687,4	L Jahresverbrauch pro Boot			
81	Motorboote > 250 und < 500kW Leistung	Gesamtjahresverbrauch von		217679	Liter		
<b>Gesamtanzahl Motorboot</b>			<b>26714</b>				
<b>Gesamtverbrauch Kraftstoff</b>						<b>12169754,92</b>	<b>Liter Kraftstoff</b>

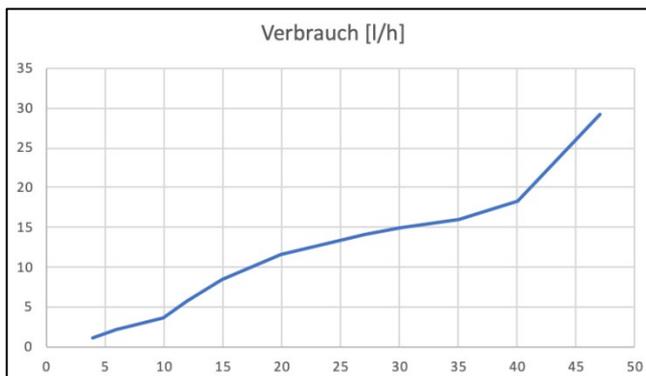
## 8.7 Ermittlung der Kraftstoffverbräuche bei einer Versuchsfahrt

Verbrauchsmessungen an einem Motorsportboot (SP 7.0) mit 100 PS Antriebsleistungen der Firma Speedwave, Kressbronn

Messdaten:

Motordrehzahl [1/min]	Geschwindigkeit [km/h]	Verbrauch [l/h]	Verbrauch [l/100km]
	4	1,2	30,00
	6	2,1	35,00
1.900,00	10	3,6	36,00
2.110,00	12	5,7	47,50
2.850,00	15	8,5	56,67
3.060,00	20	11,5	57,50
3.500,00	27	14,2	52,59
3.750,00	30	14,9	49,67
3.920,00	35	16	45,71
4.100,00	40	18,4	46,00
5.000,00	47	29,3	62,34

Auftragung Verbrauch pro Stunde über die Geschwindigkeit:



Auftragung Verbrauch 100 km über die Geschwindigkeit:

