



CO₂-freie Hafen- und Logistikprozesse durch Wasserstofftechnologie am Beispiel der Stadt Brake (Unterweser) – Wesermarsch (H2BrakeCO2)



Die Entwicklung der Region Brake Unterweser, speziell in der Stadt Brake (Unterweser) als Wasserstoffregion wird im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP2) mit insgesamt 273.518,00 Euro durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (PtJ) umgesetzt.



Impressum & Grußwort

Auftragnehmer

COSMO UG

Herr Prof. Dr. Ing. Benjamin Wagner vom Berg
Butteldorf 10
26931 Elsfleth

Bearbeitung:

*Herr Prof. Dr. Ing. Benjamin Wagner vom Berg
(Wissenschaftlicher Leiter, COSMO UG)
Herr Senad Hasanspahic (Projektmanager, Stadt Brake)
Frau Camile Rau (COSMO UG)
Herr Jan Andreas (ANLEG GmbH)
Herr Claas Schott (H2BX e.V.)
Herr Hilmer Heineke (THHIMA GmbH & Co. KG)
Frau Sinah Kok (THHIMA GmbH & Co. KG)
Herr Carsten Jaster (AD.vis Experts GmbH)
Herr Wolfgang Ranft (AD.vis Experts GmbH)
Herr Ronald Brandes (Automotive Northwest e.V.)*

Auftraggeber



Stadt Brake (Unterweser) – Der Bürgermeister –

Herr Michael Kurz
Schrabberdeich 1
26919 Brake (Unterweser)



Hinweis zum vorliegenden

Dokument

Diese Ausarbeitung der verschiedenen Aspekte, Darstellungen und Nutzungsmöglichkeiten innerhalb des Dokumentes entsprechen keinem Gutachten und Erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das Dokument gilt nur in seiner Gesamtheit. Die Informationen in diesem Dokument sind nach bestem Wissen und Gewissen unter der Zuhilfenahme der aufgeführten Quellen zusammengestellt und dienen einem allgemeinen Informationszweck. Eine Haftung oder Garantie für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der zur Verfügung gestellten Informationen und Daten ist ausgeschlossen. Die Ausarbeitung ersetzt keine rechtliche, wirtschaftliche oder technische Beratung im Einzelfall. Die Vervielfältigung und Verbreitung von Informationen und Daten (Text, Bilder, Grafiken) aus diesem Dokument ohne vorherige schriftliche Zustimmung ist untersagt. Dies gilt auch für die auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung. Inhalte und Rechte Dritter in diesem Dokument sind als solche gekennzeichnet und erhalten ebenfalls keine Haftung oder Garantie für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit. Hierfür verantwortlich sind jeweils die Ursprungsquellen, die dem Quellenverzeichnis entnommen werden können.

Gleichstellungshinweis

Zur besseren Lesbarkeit sind innerhalb dieses Dokumentes personenbezogene Bezeichnungen meist nur in der männlichen Form ausgeführt. Selbstverständlich sind damit alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen

Stadt Brake (Unterweser), 30.09.2021

Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Projektträger:



Grußwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die Stadt Brake (Unterweser) wurde im Rahmen des BMVI-Geförderten und NOW-kooordinierten HyLand-Programms zur Förderung von Wasserstoffregionen in Deutschland als eine von 13 HyExperts-Regionen ausgewählt. Die Förderung im HyExperts-Programm soll die regionale Erstellung von Wasserstoffkonzepten ermöglichen und damit einen Beitrag zur Einhaltung der formulierten Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 leisten.

Dies haben wir zum Anlass genommen das Projekt H2BrakeCO2 ins Leben zu rufen. Ziel des Projektes war, die Erstellung eines Gesamtkonzepts zur Integration einer Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel des Seehafens Brake und der umliegenden Metropolregion Nordwest.

Bedanken möchte ich mich auf diesem Wege bei unseren Kernpartnern, den Firmen THHIMA, COSMO, ANLEG, AD.VIS Experts, dem Verein H2BX e.V. der Automotiv Nordwest, sowie der Metropolregion Nordwest für die intensive und vorbildliche Mitarbeit, ohne die die erfolgreiche Konzepterstellung nicht möglich gewesen wäre.

Einen ganz besonderen Dank gilt unserem wissenschaftlichen Leiter, Herrn Prof. Dr. Benjamin Wagner vom Berg und unserem Projektmanager, Senad Hasanspahic, die die Fäden zusammengehalten und die nötige Struktur in die Konzeption gegeben haben.

Dank auch an Niedersachsen Ports, die Fa. L.I.T, der J. Müller AG, und dem Oldenburg-Ostfriesischen Wasserverband die uns mit Rat und Tat zur Seite standen.

Der Projektzeitraum war sehr arbeitsintensiv aber auch erfolgreich. Das Ergebnis kann sich sehen lassen und auch als Blaupause für andere Hafen-Regionen dienen. Erste kleine Erfolge stellen sich bereits ein. So wird im Hafen Brake eine Tank- und Rastanlage gebaut, in der auch eine Wasserstofftankstelle integriert werden soll. Zudem melden sich bei mir vermehrt Unternehmen, die an einer Wasserstoffproduktion im Hafen interessiert sind. Konkrete Planungen sind in Arbeit.

Das beweist mir, dass wir mit unserer Konzeption eine Grundlage geschaffen haben, die einerseits für die wirtschaftliche Entwicklung unserer Stadt und der Region von Vorteil ist und andererseits auch zur Erreichung der Klimaziele beiträgt.

Michael Kurz

Bürgermeister der Stadt Brake (Unterweser)

Inhaltsverzeichnis

Grußwort	III
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung	1
2 Räumliche Abgrenzung des Gesamtkonzepts	9
2.1 Infrastruktur des Untersuchungsgebiets.....	9
2.1.1 Hauptverkehrsadern des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet	10
2.1.2 Binnenschiffanbindung der Stadt Brake.....	12
2.1.3 Schienennetzanbindung der Stadt Brake	13
2.1.4 Seehafen der Stadt Brake	13
2.2 Stakeholder der Hafen- und Straßengüterlogistik im Untersuchungsgebiet.....	17
2.2.1 Einflussbereich der Hafen- und Straßengüterlogistik	22
3 Aufnahme des Ist-Zustandes.....	23
3.1 Input Erneuerbarer Energien im Untersuchungsgebiet Wesermarsch	23
3.1.1 Erzeugter Strom aus Erneuerbaren Windenergie-, Solar- und Biogasanlagen in der Wesermarsch	26
3.1.2 Abgeregelte Energiemengen in Niedersachsen und der Wesermarsch	33
3.2 Exkurs in das EEG.....	36
3.3 Geeignete Gebiete für die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur	43
3.3 Stromnetzausbau in der Wesermarsch	60
3.4 Abgleich mit anderen Wasserstoffinitiativen in der Region	62
4 Methodenbasierte Aufnahme der Wasserstoffanwendungsfälle	72
4.1 Gewählte Methode zur Aufnahme der Wasserstoffanwendungsfälle.....	72
4.1.1 Auswahl der zu befragenden Unternehmen	72
4.2 Auswertung der Ergebnisse für die Hafen- und Logistikprozesse.....	73
4.3 THG-Einsparpotentiale der Hafen und Logistikprozesse.....	74
4.3.1 THG-Einsparpotentiale der Umschlagprozesse im Hafen von Brake	79
4.3.2 THG-Einsparpotentiale der LKW-Transporte in und aus dem Hafen.....	81
4.3.3 THG-Einsparpotentiale der Schiffsverkehre im Hafen von Brake	82
4.3.4 THG-Einsparpotentiale durch Landstromversorgung im Hafen von Brake	83
4.3.5 Fazit der THG-Einsparpotentiale des Untersuchungsgebiets	84
4.3.6 Mögliche Wasserstoffanwendungen in der Transportwirtschaft.....	85
4.3.7 Mögliche Wasserstoffanwendungen im Betrieb der Hafenanlagen	86
4.3.8 Mögliche Wasserstoffanwendungen im Schifffahrtsbereich	87
4.3.9 Priorisierung der Wasserstoffanwendungsfälle	89

4.4	Projektbeitrag zur weiteren Wasserstoffforschung	92
4.4.1	Förderung der Wasserstoffforschung durch Vergabe Wissenschaftlicher Arbeiten	94
5	Ausarbeitung der Wasserstoffanwendungsfälle	96
5.1	Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake	102
5.1.1	Wasserstoffbedarf für die Umschlagprozesse im Hafen der Stadt Brake	103
5.1.2	Flurförderfahrzeuge	106
5.1.3	Bagger	108
5.1.4	Rangierlokomotiven	109
5.1.5	Krane	109
5.1.6	Reinigungsfahrzeuge	110
5.1.7	Gesamtwasserstoffbedarf der Umschlagprozesse	110
5.1.8	THG-Einsparung durch Einsatz von Wasserstofftechnologie in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake	113
5.1.9	Ermittlung der Investitionskosten (CAPEX) für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake	113
5.1.10	Ermittlung der laufenden Kosten (OPEX) für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake	114
5.2	Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake	116
5.2.1	Wasserstoffbedarf für die Straßengüterlogistik der Stadt Brake	116
5.2.2	TGH-Einsparpotential durch Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake	122
5.2.3	Ermittlung der Investitionskosten für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake	122
5.2.4	Ermittlung der laufenden Kosten für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake	123
5.3	Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung für den Schiffsverkehr in der Stadt Brake	125
5.3.2	Wasserstoffbedarf für den Schiffsverkehr in der Stadt Brake	131
5.3.3	THG-Einsparpotential durch Einsatz von auf Wasserstoff basierender Methanol-Technologie im Schiffsverkehr der Stadt Brake	133
5.3.4	Ermittlung der Investitionskosten für den Einsatz von Methanol als Treibstoff im Schiffsverkehr der Stadt Brake	133
5.3.5	Ermittlung der laufenden Kosten für den Einsatz von Methanol als Treibstoff im Schiffsverkehr der Stadt Brake	135
5.3.6	Implementierung der Methanol-Herstellung in die bestehende Wasserstoff- Infrastruktur	137

5.4	Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung für die Landstromversorgung in der Stadt Brake	143
5.4.1	Wasserstoffbedarf für die Landstromversorgung in der Stadt Brake	147
5.4.2	THG-Einsparpotential durch Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Landstromversorgung in der Stadt Brake	148
5.4.3	Umsetzungsplan für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Landstromversorgung in der Stadt Brake	154
5.5	Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung in der Personenmobilität der Unternehmen der Stadt Brake	156
5.6	Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffanwendung zum Erreichen einer Klimaneutralität der Hafen- und Straßengüterlogistik	159
5.7	Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Wasserstofftechnologien in der Hafen- und Straßengüterlogistik	161
6	Gestaltung der Infrastruktur	165
6.1	Anschaffung eines Elektrolyseurs	165
6.1.1	Ermittlung der notwendigen Elektrolyseurleistung	166
6.1.2	Festlegung von Art und Standort des Elektrolyseurs	169
6.1.3	Ermittlung der Anschaffungs- und laufenden Kosten eines PEM-Elektrolyseurs	171
6.1.4	Maßnahmen zur Deckung der Differenz aus erzeugbarer Wasserstoffmenge und Gesamtbedarf	172
6.2	Untersuchung vorhandener Speicherungsmöglichkeiten	176
6.2.1	Kosten für die Speicherung des erzeugten Wasserstoffs	179
6.3	Transport und Verteilung des erzeugten Wasserstoffs	180
6.3.1	Distribution des erzeugten Wasserstoffs	180
6.3.2	Kosten für den Transport und die Verteilung des erzeugten Wasserstoffs ...	181
6.3.3	Investitionskosten für die Bereitstellung des Wasserstoffs	182
6.3.4	Wirtschaftlichkeit der infrastrukturellen Maßnahmen	183
7	Fazit und weitere Vorgehen	185
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	185
7.2	Weiteres Vorgehen in Bezug auf das etablierte Netzwerk (regionale Strukturen, Einbindung in das HyLand Netzwerk – Erwartungen und Beitrag)	187
7.3	Nächste Schritte (Bewerbung auf HyPerformer, Förderanträge, Studien, Strategien, Projektierung, etc.)	187
7.4	Akzeptanz und Öffentlichkeitsarbeit / Erfolgsfaktoren	188
7.5	Übertragbarkeit auf andere Regionen	189
8	Literaturverzeichnis	190
	Anhang I	VI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CO ₂ -Minderungspotential durch H ₂ -Technologie in verschiedenen Segmenten bis 2050.....	1
Abbildung 2: Vergleich der Abdeckung verschiedener Transportbedarfe durch BEV (Batteriegetriebene Elektrofahrzeuge) und FCEV (Wasserstoffbasierte Elektrofahrzeuge).....	2
Abbildung 3: Darstellung des angestrebten Wertschöpfungskreislaufs für H ₂ BrakeCO ₂	3
Abbildung 4: Produktion, Speicherung, Transport und Einsatz von Wasserstoff (exemplarisch gezeigt für windbasierte Stromerzeugung, stellvertretend für Solar und Biogas)	4
Abbildung 5: Endenergieverbrauch 2018 nach Sektoren und Energieträgern	5
Abbildung 6: Potential schwerer Nutzfahrzeuge für Klimazielerreichung.....	7
Abbildung 7: Anbindung der Stadt Brake an die Hauptverkehrsadern des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet Quelle: Google Maps	11
Abbildung 8: Binnenwasserstraßen in Untersuchungsgebiet Quelle: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt – Bundeswasserstraßenkarten	12
Abbildung 9: Schienennetz im Untersuchungsgebiet.....	13
Abbildung 10: Übersichtsplan des Seehafens der Stadt Brake	14
Abbildung 11: Blick auf den Niedersachsenkai und die Braker Niederlassung der Olenex Edible Oils GmbH.....	15
Abbildung 12: Blick auf die Südpier mit AGRI-Terminal und dem Binnenhafen.....	16
Abbildung 13: Blick auf die Nordpier mit dem Breakbulk Terminal und dem Brake Logistics-Center	17
Abbildung 14: Stakeholder der Hafen und Straßengüterlogistik im Untersuchungsgebiet	18
Abbildung 15: Lage der Windenergieanlagen in der Wesermarsch (nördlicher Teil)	27
Abbildung 16: Lage der Windenergieanlagen in der Wesermarsch (südlicher Teil)	28
Abbildung 17: Übersichtsplan der Gewerbegebiete in der Wesermarsch.....	44
Abbildung 18: Stromnetzausbau in der Wesermarsch	61
Abbildung 19: Wasserstoffinitiativen in den fünf norddeutschen Bundesländern.....	63
Abbildung 20: Anteil der befragten Unternehmen, der Nachhaltigkeitsberichte erstellt	73
Abbildung 21: Anteil der befragten Unternehmen, der Energieberichte erstellt	74
Abbildung 22: Anteil der befragten Unternehmen, die ihre THG-Emissionen erfassen	75
Abbildung 23: Zahlenmäßige Aufteilung der im Untersuchungsgebiet erhobenen Fahrzeuge	77
Abbildung 24: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Flurförderfahrzeuge in Höhe von 1.767,40 t CO ₂ e nach Traglasten.....	79
Abbildung 25: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Mobilkrane in Höhe von 520,28 t CO ₂ e	80
Abbildung 26: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Bagger in Höhe von 1.973,08 t CO ₂ e.....	81
Abbildung 27: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Schiffe in Höhe von 2.235,88 t CO ₂ e	82
Abbildung 28: Aufteilung der Gesamttreibhausgasemissionen in Höhe von 29.359,65 t CO ₂ e auf die verschiedenen Fahrzeugtypen	84
Abbildung 29: Vergleich des Treibhausgaseinsparpotentials [t CO ₂ e / Jahr und Stück] nach Fahrzeugart.....	90
Abbildung 30: Vergleich des Treibhausgaseinsparpotentials insgesamt [t CO ₂ e / Jahr] nach Fahrzeugart.....	90
Abbildung 31: Smarte Logistik	93

Abbildung 32: Vorschlag zur Umsetzung des BVerfG-Beschlusses und des neuen EU-Klimagesetzes der Agora Energiewende	97
Abbildung 33: Umsetzung der Klimaziele 2021 durch die Einsparung von THG-Emissionen im Untersuchungsgebiet H2BrakeCO2 durch mögliche Wasserstoffanwendungen bezogen auf die jeweiligen Fahrzeugtypen	102
Abbildung 34: Entwicklung der täglichen Wasserstoffbedarfe der Umschlaggeräte resultierend aus der anzustrebenden Entwicklung der Fahrzeugs substitutionen	111
Abbildung 35: Abnahme der Treibhausgasemission der Umschlagprozesse im Hafen der Stadt Brake durch Einsatz der Wasserstofftechnologie	113
Abbildung 36: Lageplan der geplanten Tank- und Rastanlage im Braker Hafen gemäß Bauantrag der Truckpoint Braker Hafen GmbH vom 11.10.2021	118
Abbildung 37: Lage der geplanten Tank- und Rastanlage im Braker Hafen	118
Abbildung 38: Entwicklung der täglich zu produzierenden Wasserstoffmenge zur Deckung des Wasserstoffbedarfs der LKW resultierend aus der anzustrebenden Entwicklung der Fahrzeugs substitutionen	120
Abbildung 39: Herstellungspfade von Methanol unterteilt in grünes, blaues, graues und braunes Methanol (Darstellung aus Masterarbeit von Anna - Maria Frei nach Angaben von C. Chatterton übernommen.)	126
Abbildung 40: Herstellung und Anwendung von PtL-Methanol	131
Abbildung 41: Umrüstung eines Synthesegaskonverters durch einen adiabatischen Reaktor	139
Abbildung 42: Fließbild der wesentlichen Schritte der Methanol-Produktion aus Biomasse	139
Abbildung 43: Fließbild der wesentlichen Schritte der Methanol-Produktion aus erneuerbaren Energien	140
Abbildung 44: Dezentrale Power-To-Methanol-Anlage	140
Abbildung 45: Betankungsmöglichkeiten für Methanol	142
Abbildung 46: Prinzip der Landstromversorgung	144
Abbildung 47: Gegenüberstellung des Einsatzes von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen in Form von Entscheidungsstufen	157
Abbildung 48: Maßnahmen betrieblichen Mobilitätsmanagements	158
Abbildung 49: Produktionskosten für Wasserstoff in Abhängigkeit von Elektrolyseurleistung und Stromeinkaufspreis <i>Variante ohne Stromsteuer gemäß § 9a Abs. 1 Ziffer 1 StromStG; keine Netzentgelte, EEG-Umlage anteilig zw. 15% und 40%</i>	167
Abbildung 50: Wasserstoffgestehungskosten in Abhängigkeit Betriebsstunden und der Kosten für den Strombezug	171
Abbildung 51: Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs der BRD bis zu dem Jahr 2045	173
Abbildung 52: Entwicklung des Primärenergiebedarfs der BRD bis zu dem Jahr 2045	174
Abbildung 53: Kolbenkompressor mit einer Leistung von ca. 20 kg/h	176
Abbildung 54: Firma Fibatech 900 bar H2 Pufferspeicher Stahlbehälter Batterie für H2 Tankstellen	178
Abbildung 55: NPROX 20“ Container 500 bar und 500 kg	178
Abbildung 56: Beispiel 40“ Container Hexagon auf LKW montiert	179
Abbildung 57: Transportkosten in \$/kg in Abhängigkeit der täglichen Transportmenge und der Transportdistanz. (P = Pipelinetransport; G = H2 gasförmig auf LKW; L= H2 flüssig auf LKW)	181
Abbildung 58: Beispiel einer Betankungsanlage als Containerlösung	183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entfernungsangaben von Brake zu anderen Orten der innerhalb und außerhalb der Wesermarsch [Eigenen Darstellung nach Angaben aus Google Maps; Werte gerundet]	11
Tabelle 2: Gesamtumschlag im Hafen von Brake für das Jahr 2020.....	14
Tabelle 3: Technische Daten Niedersachsenkai	15
Tabelle 4: Technische Daten AGRI-Terminal	16
Tabelle 5: Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Einzugsgebiet Brake	29
Tabelle 6: Mögliche Versorgung von Haushalten in Brake mit erneuerbaren Energien aus dem Umfeld	29
Tabelle 7: Durchschnittsleistungen und Volllaststunden der erneuerbaren Energiequellen in Brake und Umgebung.....	30
Tabelle 8: Stromproduktion in den neun Gemeinden der Wesermarsch aus erneuerbaren Energiequellen	30
Tabelle 9: Durchschnittsleistungen in der Wesermarsch aus erneuerbaren Energiequellen ..	31
Tabelle 10: Mögliche Versorgung von Haushalten in der Wesermarsch mit Erneuerbare Energiequellen	31
Tabelle 11: Gesamtbedarf an elektrischer Energie in der Wesermarsch (2018)	32
Tabelle 12: Entwicklung der Ausfallarbeit (nach § 14 EEG) nach Erneuerbaren Energieträgern (in GWh)	34
Tabelle 13: Überblick erneuerbare Energieträger nach Bundesland: (Anlagenanzahl, Installierte Leistung, eingespeiste Jahresarbeit, am 31.12.2018).....	34
Tabelle 14: Verteilung der EinsMan-Maßnahmen im Gesamtjahr 2018 nach ausgewählten Bundesländern	35
Tabelle 15: Wasserstoffvorhaben mit dem Fokus auf Häfen und/oder Straßengüterlogistik..	64
Tabelle 16: Übersicht der in der Unternehmensbefragung erhobenen Fahrzeuge und Umschlaggeräte	76
Tabelle 17: Anzahl und Gesamtemission [t CO ₂ e] der für eine Umstellung geeigneter Fahrzeuge	89
Tabelle 18: Zugelassene Jahresemissionsmengen für den Verkehrssektor nach Vorschlag für Klimaschutzgesetz 2021.....	97
Tabelle 19: Jährliche anzustrebende Entwicklung der Treibhausgasemissionen [t CO ₂ e] gemäß Agora Energiewende zum Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2045.....	98
Tabelle 20: Kumulierte einzusparende Menge an Treibhausgasemissionen [t CO ₂ e] bis zu dem jeweiligen Jahr.....	99
Tabelle 21: Kumulierte Anzahl der zu substituierenden Fahrzeuge je Fahrzeugart zum jeweiligen Jahr.....	100
Tabelle 22: Mittlere Einsatzzeiten der Flurförderfahrzeuge im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug	103
Tabelle 23: Mittlere Einsatzzeiten der Bagger im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug	104
Tabelle 24: Mittlere Einsatzzeiten der Rangierlokomotiven im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug	104
Tabelle 25: Mittlere Einsatzzeiten der Krane im Hafen der Stadt Brake pro Gerätetyp	104
Tabelle 26: Mittlere Strecke der Reinigungsmaschinen im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug	104
Tabelle 27: Ergebnis der Untersuchung von am Markt verfügbaren wasserstoffbetriebenen Umschlaggeräten und Fahrzeugen.....	104
Tabelle 28: Wasserstoffbedarfe unterschiedlicher Brennstoffzellenleistungen	105

Tabelle 29: Maximaler stündlicher Wasserstoffbedarf der Fahrzeuge und Umschlaggeräte	105
Tabelle 30: Entwicklung der täglichen Wasserstoffbedarfe der Umschlaggeräte und Fahrzeuge im Braker Hafen [Kg/Tag]	112
Tabelle 31: Übersicht einer Auswahl von am Markt verfügbarer wasserstoffbetriebener Nutzfahrzeuge	119
Tabelle 32: Entwicklung des täglichen Wasserstoffbedarfs durch die in der Straßengüterlogistik zu substituierenden LKW [Kg/Tag]	121
Tabelle 33: Mautsätze in Abhängigkeit der Emissionsklasse sowie der Achsanzahl und dem zulässigen Gesamtgewicht	124
Tabelle 34: Gegenüberstellung der antriebsbedingten Betriebskosten von Diesel- und BZ-LKW	125
Tabelle 35: Datengrundlage zur Berechnung der Methanol- und Wasserstoffbedarfe, sowie zur Ausarbeitung der Anwendungsfälle im Schifffahrtssektor	128
Tabelle 36: Darstellung des Methanol-Bedarfs bei Betrachtung aller identifizierten Schiffstypen.....	129
Tabelle 37: Entwicklung des jährlichen und täglichen Methanol-Bedarfs angepasst an den Umsetzungsplan von H2BrakeCO2	130
Tabelle 38: Jährlich und täglich notwendige Wasserstoffmengen zur Abdeckung des Bedarfs der Herstellung von Methanol für das Untersuchungsgebiet Brake.....	132
Tabelle 39: CO2e-Emissionen der wasserseitigen Logistik des Untersuchungsgebietes H2BrakeCO2 im Ist-Zustand.....	133
Tabelle 40: CO2e-Emissionen der wasserseitigen Logistik durch den Einsatz von grünem Methanol	133
Tabelle 41: Umbau -und Neubaukosten verschiedener Schiffstypen	134
Tabelle 42: Übersicht aller im Untersuchungsgebiet vorkommenden Schiffsleistungsklassen und daraus berechnete Umrüstungskosten.	135
Tabelle 43: Übersicht der Produktionskosten von Methanol (Daten nach Bos, Kersten & Brilman).....	136
Tabelle 44: Darstellung von möglicher jährlicher Treibstoffkosten für grünes Methanol an dem Beispiel "Peilboot"	137
Tabelle 45: In- und Output einer Power-to-Methanol-Anlage mit einem jährlichen Methanol-Output von 1300 t ohne Betrachtung des Elektrolyseverfahrens	141
Tabelle 46: Abgeschätzter jährlicher Stromverbrauch und THG-Emissionen durch Schiffe in deutschen Seehäfen.....	150
Tabelle 47: Stromverbrauch je Hafenanfahrt in der BRD für Trockengutfrachter und Frachtschiffe allgemein.....	152
Tabelle 48: Wasserstofferzeugungsdaten unterschiedlicher Elektrolyseurleistungen	167
Tabelle 49: Zu installierende Elektrolyseleistung zur Deckung der Wasserstoffbedarfe der landseitigen Logistikprozesse.....	168
Tabelle 50: Zu installierende Elektrolyseleistung zur Deckung des Wasserstoffbedarfs der wasserseitigen Logistikprozesse	169
Tabelle 51: Investitionskosten für Wasserstoffbetankungsanlagen	182

Abkürzungsverzeichnis

Bio	Biogas
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
g	Gramm
GWh	Gigawattstunde
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
ha	Hektar
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
MaStR	Marktstammdatenregister
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
Mrd.	Milliarden
Mt	Megatonne
MWh	Megawattstunde
O ₂	Sauerstoff
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
SNG	Synthetic Natural Gas
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TWh	Terrawattstunde
WEA	Windenergieanlage

1 Einleitung

Die internationale Klimapolitik sieht im Rahmen des Pariser Klimaschutzabkommens eine Begrenzung der Erderwärmung auf weniger als 1,5 Grad Celsius gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung vor. Vor diesem Hintergrund hat die Bundesregierung am 12. Mai 2021 den Entwurf einer Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes beschlossen, mit der das Treibhausgasminderungsziel zum Jahr 2030 von minus 55 auf minus 65 % gegenüber 1990 angehoben werden soll. Bis 2040 sollen die Treibhausgase um 88% gemindert und bis 2045 Treibhausgasneutralität erreicht werden.¹ Ohne den Einsatz von Wasserstoff können diese Ziele nicht erreicht werden. Wasserstoff allein weist das Potential auf, 50% der Lücke zu schließen, die an THG-Einsparungen durch technische Umstellungen realisiert werden müssen, um die 1,5-Grad-Grenze der Erderwärmung nicht zu überschreiten. Die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff erstreckt sich dabei über alle Sektoren: Energiegewinnung, -speicherung und Netzstabilisierung, Verkehr, Beheizung und Energiezufuhr für Gebäude und Industrie. Auf Grund der Annahme einer zukünftigen Steigerung der Effizienz des Energiesektors, kann das Einsparpotential durch Anwendung von Wasserstoff im Transportsektor (250 Mt) im Jahr 2050 nahezu 50% des gesamten, durch Wasserstoff realisierbaren, Einsparpotentials (562 Mt) aufweisen (siehe Abbildung 1).

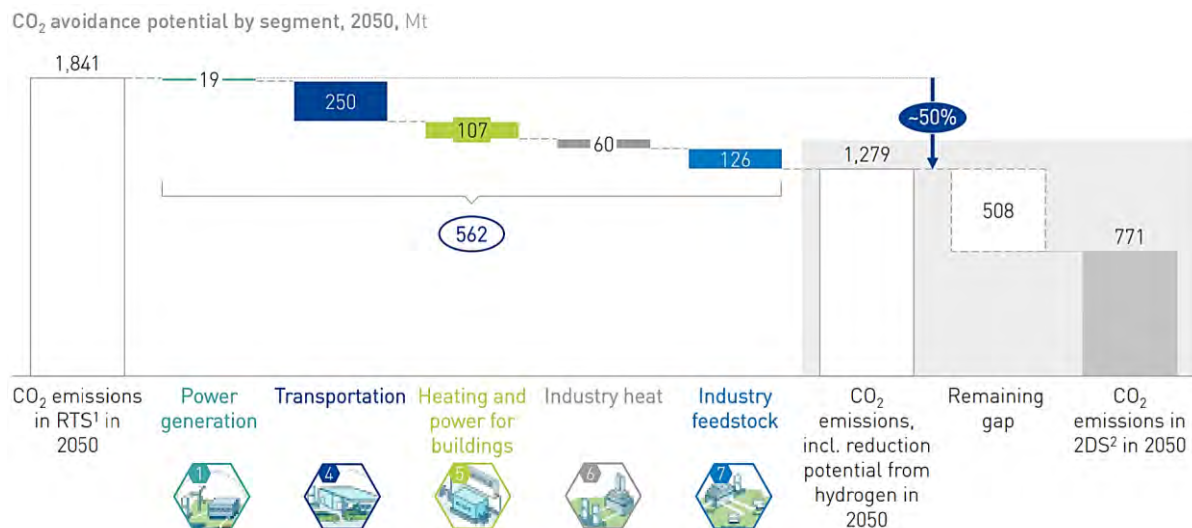


Abbildung 1: CO₂-Minderungspotential durch H₂-Technologie in verschiedenen Segmenten bis 2050²

Um einen Beitrag zum Erreichen dieser Ziele zu leisten, wurde das vorliegende Gesamtkonzept zu der Integration einer H₂-Infrastruktur in der Stadt Brake und umliegender

¹ (24)

² (2)

Metropolregion Nordwest erstellt. Der Fokus liegt dabei auf Hafen- und Logistikprozessen. Neben dem Schwerpunkt der Aufdeckung und Quantifizierung wesentlicher THG-Einsparpotentiale zielt das Gesamtkonzept auf die Abbildung eines regionalen nachhaltigen Wertschöpfungskreislaufes ab, der neben der Herstellung des Wasserstoffs mittels Erneuerbarer Energien bis zur Anwendung in der Schifffahrt, den unterschiedlichsten Transportträgern auf der Straße und als Landstromversorgung verschiedenste Wirtschaftszweige des Untersuchungsgebiets Brake und der gesamten Metropolregion involviert und berücksichtigt. Langfristig sollen so die in diesem Konzept entwickelten Strategien dazu beitragen, CO₂-freie Hafen- und Logistikprozesse zu realisieren.

In Deutschland hatte allein der Straßengüterverkehr im Jahr 2016 einen Anteil von 31,3 Prozent (51,354 Millionen Tonnen) an den THG-Emissionen des Straßenverkehrs.³ Daraus lässt sich eine hohe Dringlichkeit und das Potential für die Förderung einer Wasserstoffinfrastruktur in Bezug auf Transport- und Logistikprozesse ableiten. Auch das Ökosystem Hafen bietet ein breites Spektrum unterschiedlichster Prozesse, die durch Integration von Wasserstofftechnologien nachhaltiger gestaltet werden können.

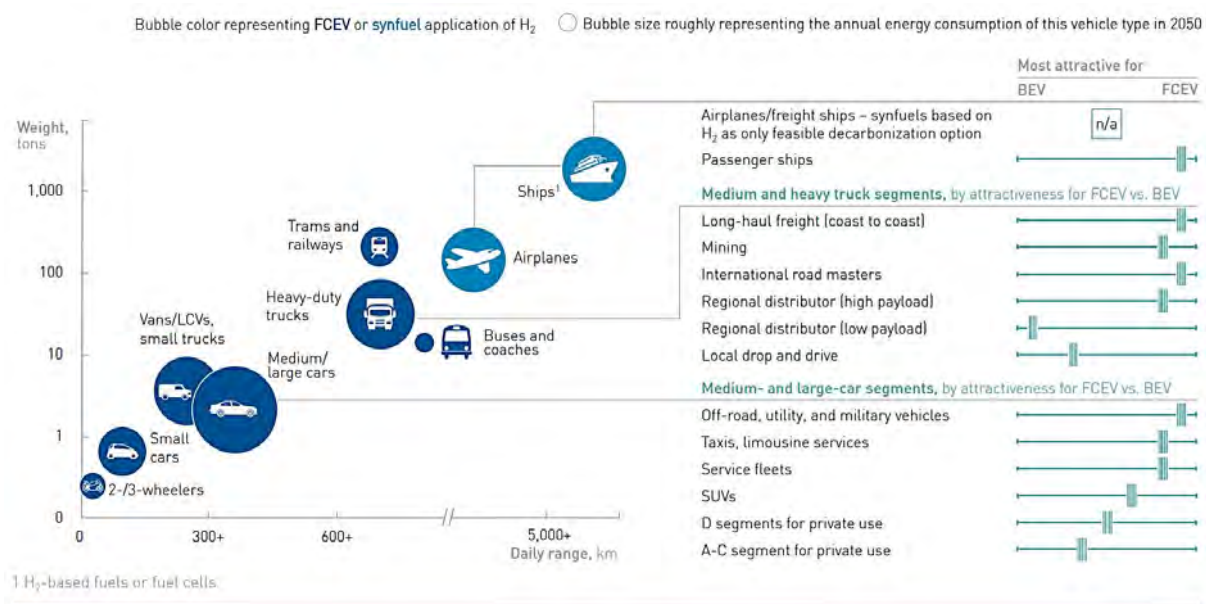


Abbildung 2: Vergleich der Abdeckung verschiedener Transportbedarfe durch BEV (Batteriegetriebene Elektrofahrzeuge) und FCEV (Wasserstoffbasierte Elektrofahrzeuge)⁴

Die Abbildung 2 unterstreicht die Sinnhaftigkeit der im Konzept angestrebten Fokussierung auf den Gütertransport. Während im Bereich des motorisierten Individualverkehrs, welcher einen Großteil der THG-Emissionen im Straßenverkehr ausmacht, der Einsatz von batteriegetriebenen Fahrzeugen im Kurzstreckenbereich sinnvoll ist, überwiegen

³ (1)

⁴ (2)

insbesondere bei Fahrzeugen mit hohem Transportvolumen und langer Fahrstrecke im Schwerlastbereich die Vorteile des Wasserstoffs. Die Schifffahrt stellt trotz erster Pilotprojekte weiterhin eine Herausforderung dar, jedoch bietet der Hafenbereich auch hier zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff, wie zum Beispiel im Einsatz einer brennstoffzellenbasierten Landstromversorgung. Dadurch wird der Einsatz von Schweröl, der in der Schifffahrt neben Diesel immer noch üblich ist, zumindest im Hafenbereich vermieden. Dies bietet ein hohes Einsparpotential an CO₂ sowie Schadstoffen und damit einhergehenden Verunreinigungen der gesamten Umwelt.

Aus Abbildung 3 gehen die Verknüpfungen innerhalb des Konzeptes von der Herstellung des Wasserstoffs bis zur Anwendung hervor. Hierbei steht die Ausschöpfung des vollen Potentials der Wasserstofftechnologie im Vordergrund, um auch für herstellungsbedingte Nebenprodukte wie Abwärme und Sauerstoff Anwendungsfelder zu konzipieren.

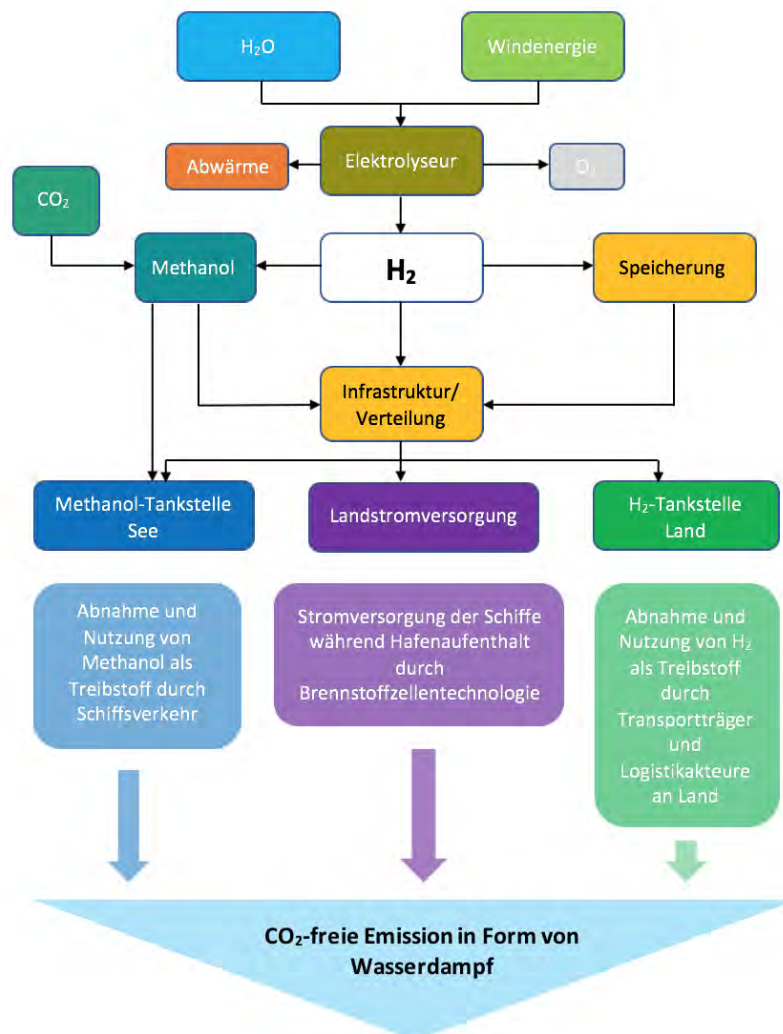


Abbildung 3: Darstellung des angestrebten Wertschöpfungskreislaufs für H2BrakeCO2

Abgefüllt in Gasflaschen existieren für Sauerstoff diverse Anwendungsfeldern in der produzierenden Industrie, die sich je nach Reinheitsgrad als Abnehmer anbieten. Die Nutzung der Abwärme ist, beispielsweise per Nahwärme, für gewerbliche Objekte, Wohngebäude bis hin zu Quartieren, aber auch für Kläranlagen und anderen Verarbeitungs- und Produktionsbetrieben möglich. Einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Schifffahrt leistet die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu den Kraftstoffen SNG (Synthetic Natural Gas) oder Methanol, welche als Treibstoffe für Schiffe mit entsprechendem Antrieb zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus kann SNG (Synthetic Natural Gas) in das Erdgasnetz integriert werden und die CO₂-Bilanz des in Umlauf gebrachten Erdgases verbessern. Nach der Phase der Wasserstoffherstellung folgt die Speicherung und Verteilung und somit der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur. Diesbezüglich wurden die zu treffenden Entscheidungen maßgeblich durch Standortanalysen beeinflusst und durch Sicherheitsvorschriften eingegrenzt. Abbildung 4 zeigt diesen Wertschöpfungskreislauf in seiner Übertragung auf unterschiedliche Sektoren und hebt so nochmal das Potential von Wasserstoff als Vehikel der Sektorenkopplung hervor.

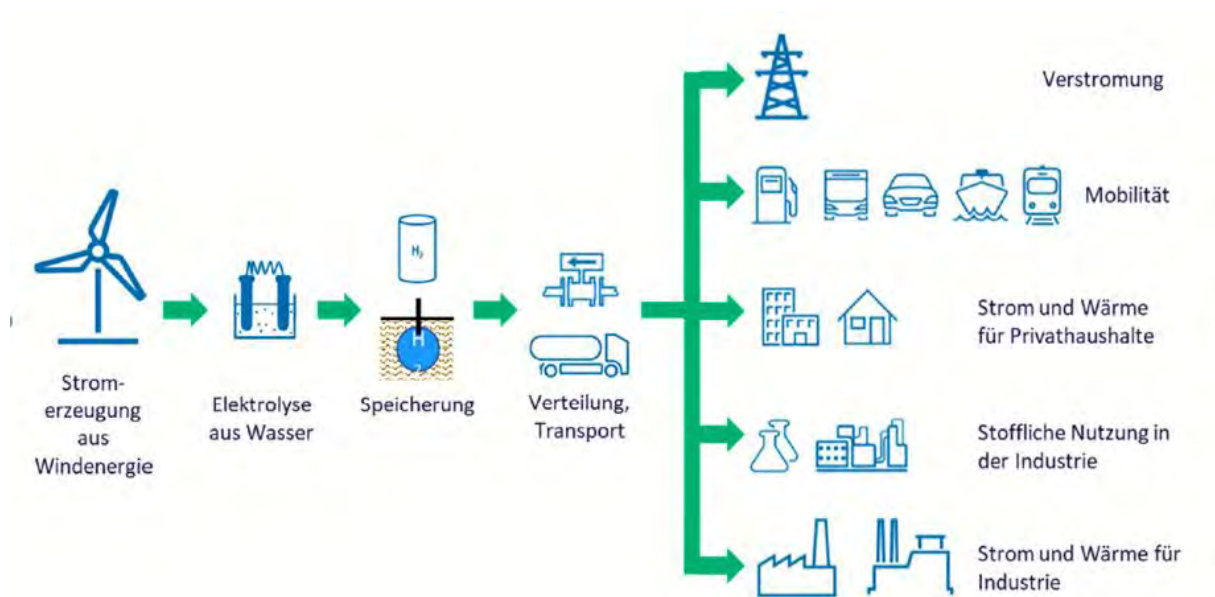


Abbildung 4: Produktion, Speicherung, Transport und Einsatz von Wasserstoff (exemplarisch gezeigt für windbasierte Stromerzeugung, stellvertretend für Solar und Biogas)⁵

Hinsichtlich der beschriebenen Klimaziele auf nationaler und europäischer Ebene spielt Wasserstoff auch eine entscheidende Rolle als Energieträger, um die für die Transformation zur CO₂-Neutralität notwendigen Energiemengen bereitzustellen. Alleine der Transportsektor hatte 2018 einen Energiebedarf von ca. 750 TWh, wovon 94% über fossile Energieträger in Form von Mineralölprodukten abgedeckt und damit importiert werden müssen.

In den anderen Sektoren gilt es hier auch ähnlich große Energiemengen durch grüne Energie

⁵ (25), S. 4

(Strom aus regenerativen Energiequellen) zu substituieren (siehe Abbildung 5)

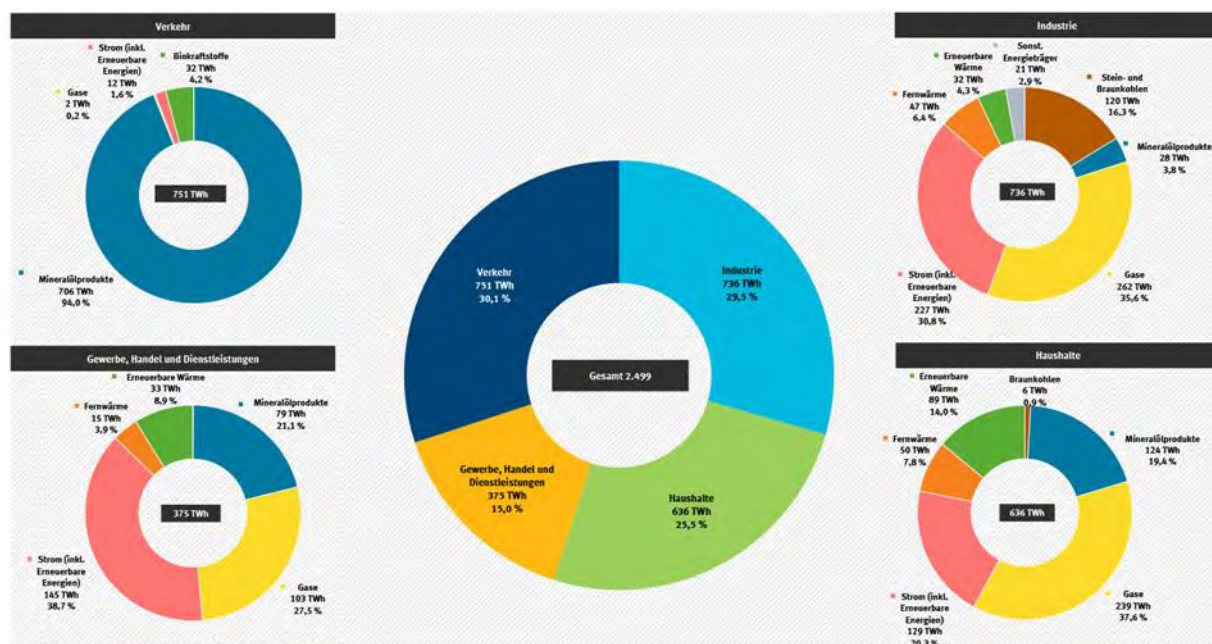


Abbildung 5: Endenergieverbrauch 2018 nach Sektoren und Energieträgern

Die hierfür benötigten Strommengen werden auch bei Ausschöpfung einer maximalen Ausbaustufe regenerativer Energie in Deutschland nicht ausreichen. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass auch der Import von Strom auf Basis des bestehenden Stromnetzes und unterstellten technischen Übertragungsweiten (aus dem europäischen Ausland) diese Mengenbedarfe nicht decken wird. Insbesondere dann, wenn man berücksichtigt, dass unsere europäischen Nachbarländer dieselben CO₂-Ziele verfolgen. Energie wird daher wie heute auch aus entfernten Regionen importiert werden müssen. Hier ist nach heutiger Erkenntnis Wasserstoff der effizienteste Energieträger, um regenerativen Strom (z.B. aus dem weiteren Nordseeraum) zu transportieren.

Im Rahmen der aktuellen Diskussion der Technologieoffenheit im Verkehrssektor, z. B. für den Schwerlastbereich ist mit Hinblick auf Nutzung in den Antrieben der Wasserstoff zu präferieren, da bspw. eine Rückverstromung zur Nutzung in batterieelektrischen Fahrzeugen, die Energieeffizienz deutlich absenken würde. Im Rahmen der Technologiediskussion macht der Einsatz von Wasserstoff im Schwerlastbereich wie er in H2BrakeCO2 fokussiert wird auch aus anderen Gründen Sinn. Hier werden aktuell noch alle drei Optionen im Rahmen der Technologieoffenheit diskutiert. Diese sind im Schwerlastbereich:

- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)
- H2-Fahrzeuge (Brennstoffzelle oder Verbrennungsmotor)

- Elektrische Oberleitungssysteme (OH) ⁶

In der Studie des Öko-Instituts⁷ wird auch für BEV ein Markthochlauf vor 2024 prognostiziert, gleichwohl wird in der Studie auch festgestellt, dass

- heute verfügbar BEV-Lkw Reichweiten zwischen 200-300 km haben und BEV-Lkw mit Reichweiten von 400-500 km ohne signifikante Nutzlastverluste erst ab 2030 zu erwarten sind
- notwendige Ladeinfrastruktur bisher fehlt und erste Lieferungen notwendiger Schnelladesysteme (1 u. 2 MW) ab 2024 erwartbar sind
- im Bereich der H2-Trucks heute schon Reichweiten von 400 km und Nutzlasten von ca. 10 t mit 32 kg Wasserstoff erzielt werden

Auch bei den Praktikern, also den Unternehmen und Verbänden in der Logistik wird die H2-Option überwiegend als die sinnvollste Option bewertet. So sehen in einer Umfrage des Vereins Hamburger Spediteure (VHSp) 35% in Wasserstoff die langfristig aussichtsreiche Option, auf Platz zwei LNG⁸ und an dritter Stelle die Batterie. Die OH-Systeme werden hier generell sehr kritisch bewertet.⁹

Abschließend gilt festzustellen, dass der hier fokussierte Schwerlastbereich im Verkehrssektor ein hohes Potential bei der Klimazielerreichung im Bereich der Nutzfahrzeuge aufweist, da mit dem Austausch vergleichsweise weniger Fahrzeuge ein hohes THG-Einsparungspotential geschöpft werden kann. (siehe Abbildung 6)

⁶ (77)

⁷ (77)

⁸ Im Rahmen der Diskussion um eine CO₂-neutrale Logistik ist LNG lediglich als Übergangstechnologie zur CO₂-Reduktion einzustufen (fossiles LNG und perspektivisch biogenes LNG)

⁹ (51) S. 2

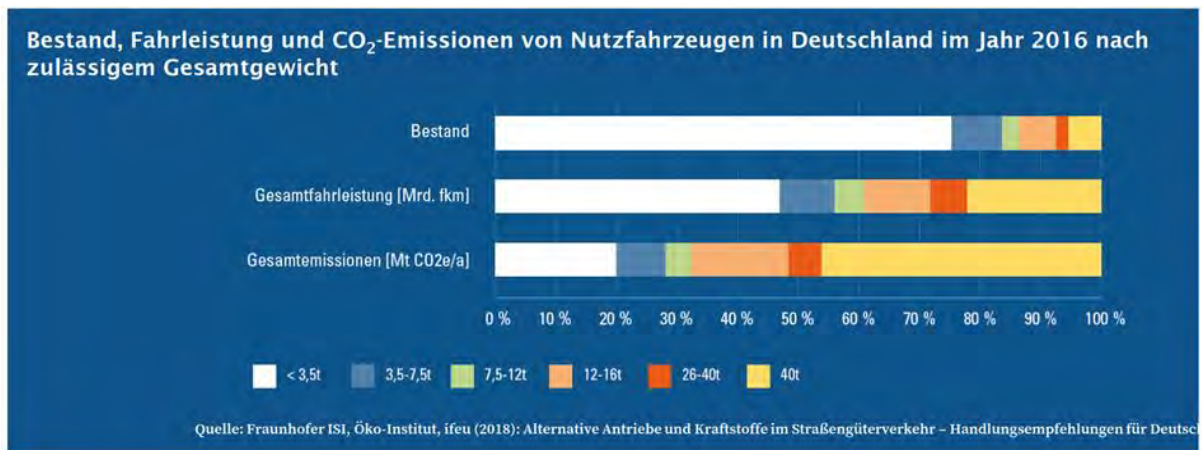


Abbildung 6: Potential schwerer Nutzfahrzeuge für Klimazielerreichung¹⁰

Konzeptstruktur

Das Gesamtkonzept teilt sich in fünf Abschnitte auf, mit denen die Bausteine für die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur geliefert werden. So sollen alle zu beachtenden Aspekte für die Umsetzung des Konzepts berücksichtigt werden.

In der räumlichen Abgrenzung des Konzepts sollen das Untersuchungsgebiet dargestellt und dessen klare Grenzen definiert werden. Des Weiteren werden die an den Hafen- und Logistikprozessen involvierten Akteure vorgesehlt.

Aus der Aufnahme des Ist-Zustandes geht das Potential und die Eignung des Untersuchungsgebiets hervor, indem zunächst der Input Erneuerbarer Energien und schließlich geeignete Gebiete für die Integration der Wasserstoffinfrastruktur ermittelt werden. Gleichzeitig sollen in einem Abgleich mit parallellaufenden Wasserstoffprojekten Synergiepotentiale aufgedeckt und die Basis für eine Zusammenarbeit geschaffen werden, um den Einstieg in eine überregionale Wasserstoffwirtschaft zu erleichtern.

Zu der Schaffung einer Datengrundlage auf der sich das Gesamtkonzept stützt wurden in der methodenbasierten Aufnahme im Rahmen von Expertenbefragungen unter Einbeziehung der Projektpartner und betroffenen Akteure Wasserstoffanwendungsfälle und Umsetzungsverantwortlichkeiten ermittelt. Hierfür wurden Fragebögen entwickelt, die von den Stakeholdern des Projekts H2BrakeCO₂ beantwortet wurden. So konnten Daten zum Energiemanagement, dem Fuhrpark, den THG-Emissionen und der Mobilität der Unternehmen erhoben werden.

¹⁰ (52)

In Anschluss an die methodenbasierte Aufnahme werden auf Basis der gesammelten Daten, Informationen und Richtlinien die Anwendungsfälle für den Schiffsverkehr, der Landstromversorgung, den hafeninternen und externen Logistikprozessen sowie der Mobilität bezüglich des H₂-Bedarfs, möglicher THG-Emissionseinsparungen und bilanzierter Kosten in Form von Umsetzungsplänen erarbeitet.

Der letzte Abschnitt des Konzepts behandelt die Gestaltung der Infrastruktur, die für die Aufrechterhaltung einer wasserstoffbasierten Hafen- und Transportwirtschaft benötigt wird. Hierzu gehören zum einen die Ermittlung der benötigten Elektrolyseurleistung sowie die Sicherstellung dessen Energiebedarfs in Form von grünem Strom. Zum anderen werden die Speicherung, die Verteilung, der Transport und die Bereitstellung des Wasserstoffs am richtigen Ort, zur richtigen Zeit und in der richtigen Menge ausgearbeitet.

Mit der erfolgreichen Umsetzung dieses Gesamtkonzepts kann die Stadt Brake durch H₂BrakeCO₂ als Blaupause für eine Bremse der kohlenstoffbasierten Transportwirtschaft anderer Standorte in Deutschland fungieren und trägt im Sinne einer „Smarten Logistik“¹¹ zu der nachhaltigen Gestaltung von Hafen- und Logistikprozessen bei.

¹¹ (123)

2 Räumliche Abgrenzung des Gesamtkonzepts

Die Stadt Brake (Unterweser) ist die Kreisstadt des Landkreises Wesermarsch und liegt 26 Kilometer stromaufwärts am seeschifftiefen Wasser der Wesermündung im Zentrum des Städtevierecks Bremerhaven, Bremen, Oldenburg und Wilhelmshaven in einer ländlichen Küstenregion im Nordosten Niedersachsens, die von einem starken regionalen Ausbau des Windenergiesektors profitiert. In Brake leben derzeit 15.319 Einwohner (Stand Mai 2019) auf einer Fläche von 38,18 Quadratkilometern. Die Wirtschaft der Stadt ist durch die direkte Lage an der seetiefen Unterweser geprägt. So befindet sich in Brake nach dem Jade-Weser-Port in Wilhelmshaven, gemessen an der Umschlagsmenge, der zweitgrößte Seehafen Niedersachsens und Deutschlands größter Importhafen für Getreide und Futtermittel. Im Landkreis Wesermarsch leben derzeit 88.624 Einwohner auf einer Fläche von 822 Quadratkilometern (Stand Dezember 2019).

In der räumlichen Abgrenzung des Gesamtkonzepts soll das Untersuchungsgebiet dargestellt und die Erreichbarkeit der Stadt Brake über die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße abgebildet werden. In einem nächsten Schritt wird eine detaillierte Betrachtung des Hafens der Stadt Brake vorgenommen, um die dort vorliegenden Prozesse und die in der Hafen- und Transportwirtschaft tätigen Akteure zu identifizieren. Gleiches erfolgt auch für das gesamte Untersuchungsgebiet, damit ein Überblick über alle Stakeholder entsteht, die für das Projekt H2BrakeCO₂ von Bedeutung sind und davon profitieren. Die Grenzen des Untersuchungsgebiets sind für die unterschiedlichen Betrachtungen in diesem Gesamtkonzept nicht immer trennscharf zu ziehen. So ist es beispielsweise auf der einen Seite sinnvoll für die Betrachtung des Ausbaus erneuerbarer Energieanlagen die Wesermarsch als Einzugsgebiet festzulegen. Werden auf der anderen Seite jedoch die infrage kommenden Unternehmen betrachtet, die von dem Projekt H2BrakeCO₂ profitieren, ist es nicht zielführend ausschließlich Unternehmen in der Wesermarsch in die Konzepterstellung einzubeziehen. Somit kann es vorkommen, dass sich an bestimmten Stellen des Konzepts die Grenzen des Untersuchungsgebiets zu anderen Abschnitten unterscheiden. Weiterhin werden andere Wasserstoffinitiativen in der Region berücksichtigt, um Synergien zu identifizieren.

2.1 Infrastruktur des Untersuchungsgebiets

Die Stadt Brake ist ein trimodaler Verkehrsknoten und über die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasser direkt erreichbar. Sie verfügt damit über ideale infrastrukturtechnische Voraussetzungen für die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur in einem logistikgeprägten

Umfeld sowie die Umsetzung einer langfristig klimaneutralen Logistik. Dieser Umstand gründet auch auf die Vielzahl der Wasserstoffanwendungsfälle, die auch durch die Lage der Stadt Brake an der seeschifftiefen Unterweser gegeben sind. Damit ist H2BrakeCO2 als multimodales Beispiel zu sehen, an dem das volle Dekarbonisierung-Potential von Wasserstoff im Bereich Verkehr veranschaulicht werden kann.

2.1.1 Hauptverkehrsadern des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Hauptverkehrsadern des Straßenverkehrsnetzes im Untersuchungsgebiet. In Nord-Süd-Richtung führt die B212 direkt an Brake vorbei und verbindet die Stadt mit den Gemeinden Nordenham, Stadland, Elsfleth, Berne und dem Landkreis Oldenburg. Über den nördlich von Brake gelegenen Wesertunnel sind die A27 und damit die Städte Bremen und Bremerhaven auch ohne Fährverbindung erreichbar. In westliche Richtung verbindet die B211 Brake mit der A29, über die wiederum die Städte Wilhelmshaven und Oldenburg erreichbar sind. Alle Gemeinden der Wesermarsch sind aus Brake bedingt durch ihre relativ geringe Distanz (siehe Tabelle 1) mit dem PKW/LKW in maximal 30 Minuten erreichbar.

Die Anwendung der Wasserstofftechnologie auf den Straßen des Untersuchungsgebiets wird sich auf den Straßengüterverkehr beschränken und nicht den Individualverkehr berücksichtigen. Diese Entscheidung basiert auf der generellen Fokussierung des Gesamtkonzepts auf Hafen- und Straßengüterlogistikprozesse aber auch auf der Überzeugung, dass mittelfristig batteriebasierte Antriebskonzepte für den Individualverkehr die effizientere Lösung für einen klimaneutralen Verkehr sind.

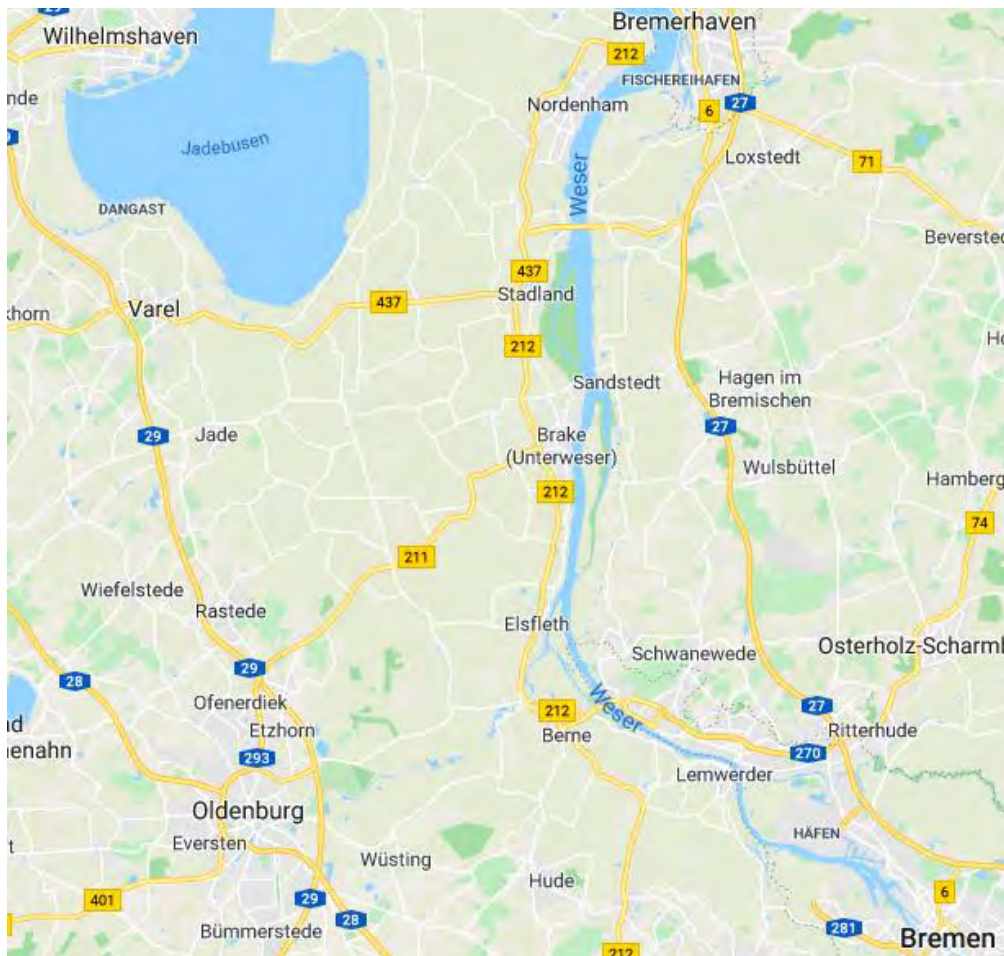


Abbildung 7: Anbindung der Stadt Brake an die Hauptverkehrsadern des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet
Quelle: Google Maps

Tabelle 1: Entfernungsangaben von Brake zu anderen Orten der innerhalb und außerhalb der Wesermarsch [Eigenen Darstellung nach Angaben aus Google Maps; Werte gerundet]

Entfernung von Brake zu	Distanz über das Straßennetz [km]
Gemeinden in der Wesermarsch	
Jade	25
Ovelgönne	8
Elsfleth	11
Berne	19
Lemwerder	29
Stadland	10
Nordenham	23
Butjadingen	35
Städten außerhalb der Wesermarsch	
Wilhelmshaven	60
Oldenburg	35
Bremen	50
Bremerhaven	42

2.1.2 Binnenschifffahrt der Stadt Brake

Wie aus Abbildung 8 hervorgeht, ist die Stadt Brake auch über Binnenschifffahrtsstraßen sehr gut an das Hinterland angebunden. Richtung Westen bestehen über Weser, Hunte und den Küstenkanal Binnenschifffahrtsverbindungen nach Oldenburg, zum Nordwesten und über die Ems bis in die Niederlande. Über die Weser sind Bremen und Bremerhaven sowie die Nordsee erreichbar.

Die Betrachtung der Schifffahrt im Untersuchungsgebiet wird sich in diesem Konzept trotz der direkten Lage an der Weser auf die Schiffsbewegungen im Hafen von Brake beschränken. Nichtsdestotrotz soll mit der zuvor beschriebenen Anbindung der Stadt Brake an das regionale Binnenwasserstraßennetz das Potential dieses Konzepts für die Entstehung von Synergieeffekten mit anderen wasserstoffbasierten Projekten mit dem Schwerpunkt der Schifffahrt verdeutlicht werden.

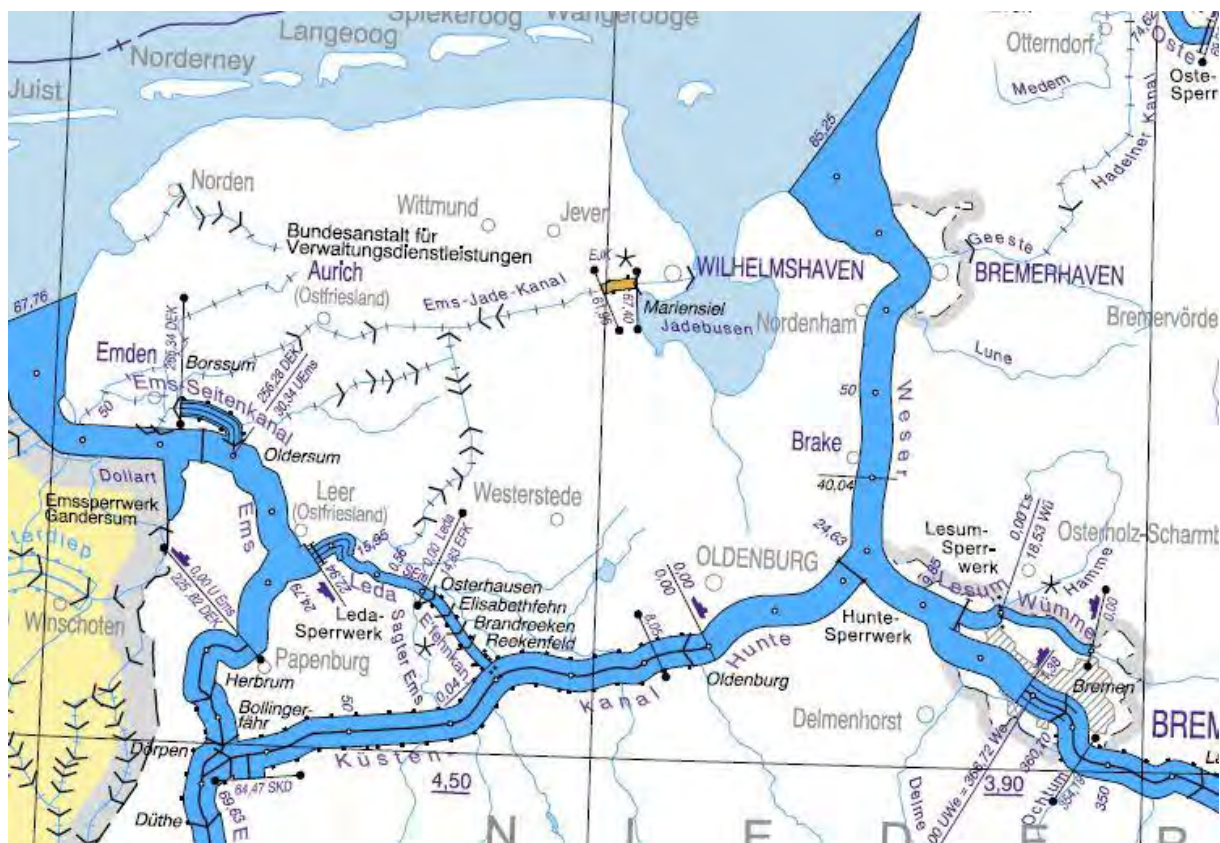


Abbildung 8: Binnenwasserstraßen in Untersuchungsgebiet

Quelle: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt – Bundeswasserstraßenkarten¹²

¹² (3)

2.1.3 Schienennetzanbindung der Stadt Brake

Abbildung 9 zeigt die Erreichbarkeit der Stadt Brake über das regionale Schienennetz. Die überwiegend eingleisige elektrifizierte Bahnstrecke Hude-Nordenham dient dem Personen- und Güterverkehr und bindet die Stadt Brake an die Bahnstrecke Bremen-Oldenburg an. Die Betrachtung des Verkehrsträgers Schiene in diesem Gesamtkonzept wird sich aufgrund der Elektrifizierung dieser Bahnstrecke auf die Rangierprozesse im Hafen der Stadt Brake beschränken, bei denen auch dieselbetriebene Lokomotiven zum Einsatz kommen.



Abbildung 9: Schienennetz im Untersuchungsgebiet¹³

2.1.4 Seehafen der Stadt Brake

Der Seehafen Brake liegt 26 Kilometer stromaufwärts der Wesermündung. Für den Straßengüterverkehr ist der Seehafen der Stadt Brake von der B212 oder der B211

¹³ (4)

Tabelle 2: Gesamtumschlag im Hafen von Brake für das Jahr 2020¹⁴

Güterumschlag 2020 (in Mio. t)	
Getreide und Futtermittel	2,7
Forstprodukte	1,6
Eisen und Stahl	0,5
Sonstige Güter	0,7
Summe Seeumschlag	5,5
Summe Binnenumschlag	1,0
Gesamtumschlag	6,5

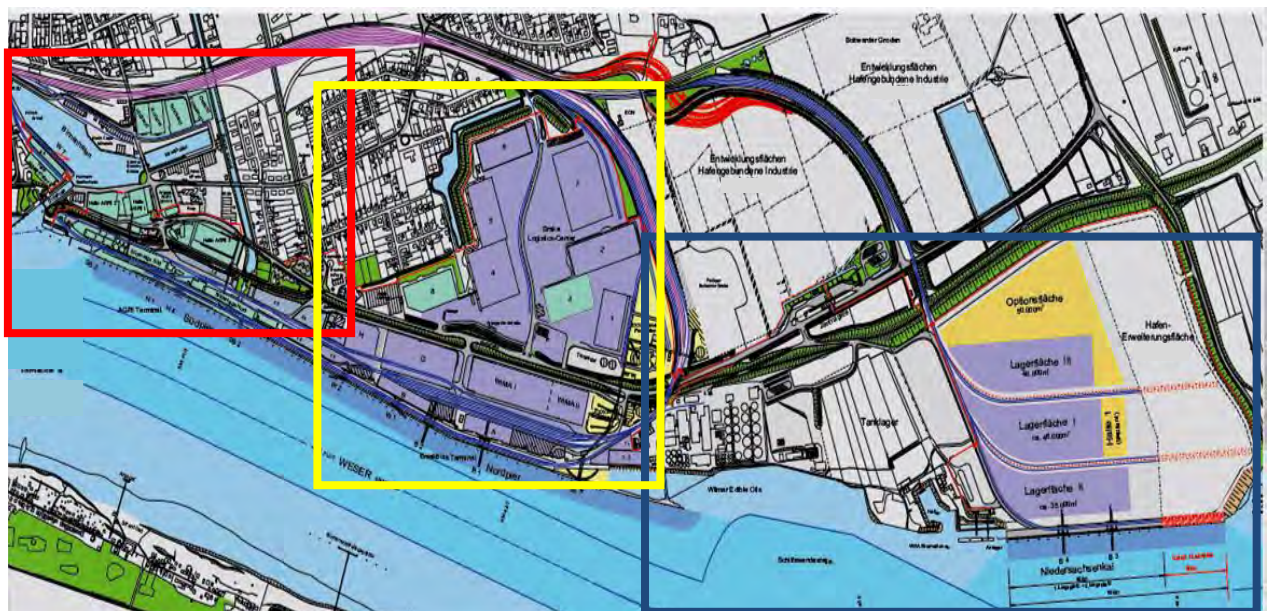


Abbildung 10: Übersichtsplan des Seehafens der Stadt Brake¹⁵

¹⁴ Vgl. (8)

15 (5)

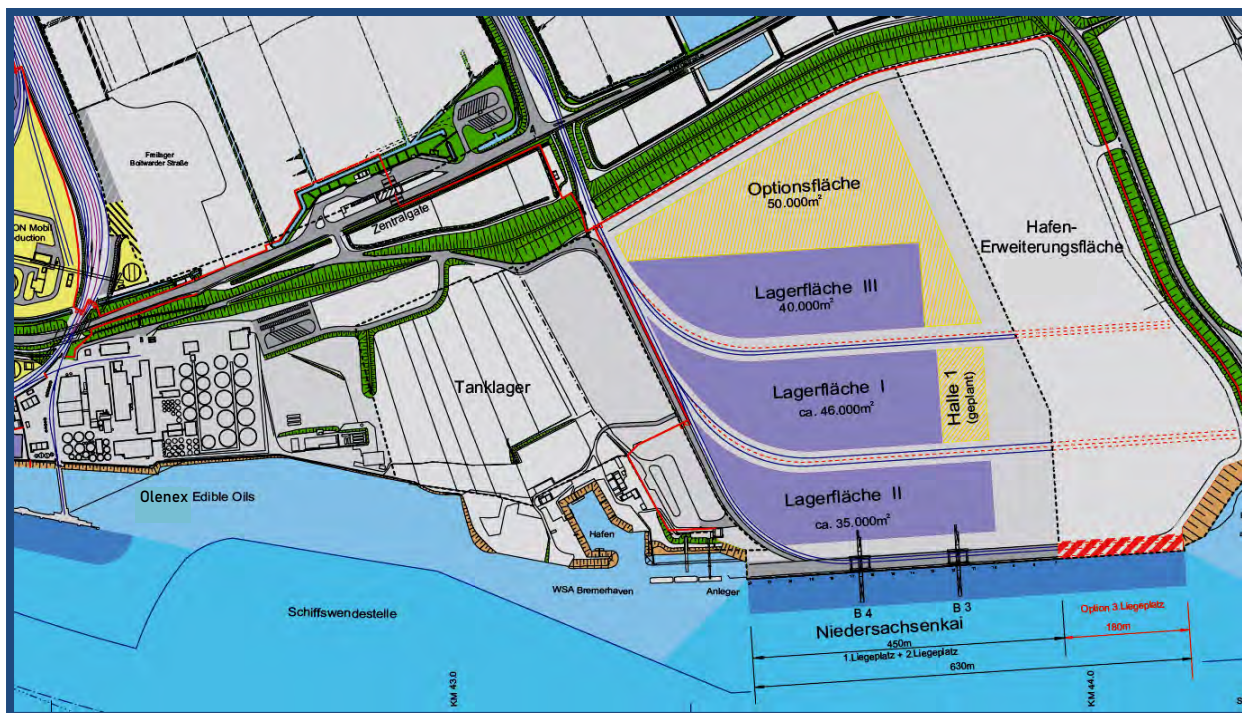


Abbildung 11: Blick auf den Niedersachsenkai und die Braker Niederlassung der Olenex Edible Oils GmbH

Auf dem offshore- und schwerlastgeeignetem Niedersachsenkai im Norden des Hafens wird auf 450 Metern und einer bewirtschafteten Terminalfläche von 140.000 m² der Umschlag von Projekt und Stückgutladungen wie Forstprodukte, Eisen, Stahl, Zellulose und Bauteilen für Windkraftanlagen betrieben. In unmittelbarer Nähe zum Niedersachsenkai befindet sich die Braker Niederlassung der Olenex Edible Oils GmbH.

Tabelle 3: Technische Daten Niedersachsenkai¹⁶

Technische Daten Niedersachsenkai	
Zulässiger Tiefgang	11,90 Meter
Gedeckter Lagerraum	8.000 Quadratmeter
Anzahl Seeschiffsliegeplätze	2
Krankapazitäten	145 Tonnen, Tandem bis zu 210 Tonnen
Schwerlasttrailer	125 Tonnen
Stapler Reachstacker Straddle Carrier	95 Tonnen

¹⁶ Vgl. (9)

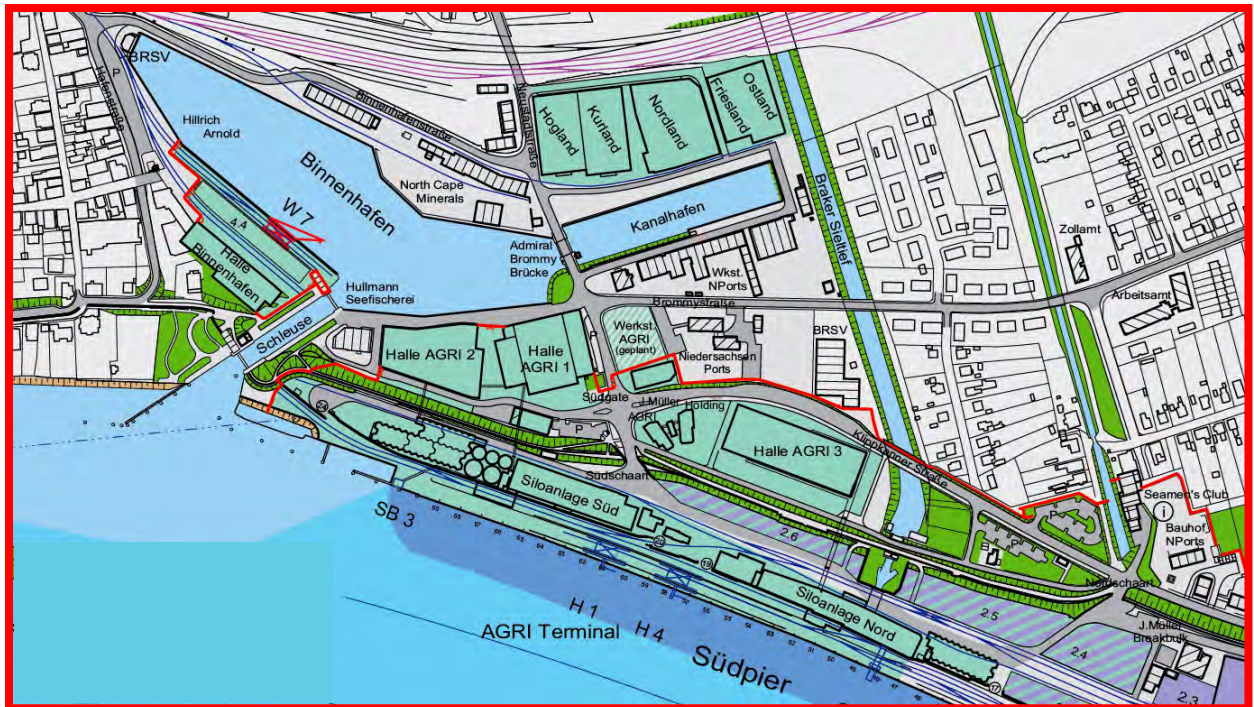


Abbildung 12: Blick auf die Südpier mit AGRI-Terminal und dem Binnenhafen

Der südliche Hafenbereich dient dem Umschlag von Futtermitteln und Getreide. Durch die Ertüchtigung der Südpier stehen seit Ende 2017 Anlegemöglichkeiten für zwei Schiffe mit einer Länge bis 270 Metern und einem Tiefgang bis 12,20 Meter zur Verfügung. Damit wurden zusätzliche Umschlagskapazitäten im stark wachsenden AGRI-Bereich geschaffen. Im Binnenhafen, der über eine Seeschleuse zu erreichen ist, können Küstenmotor- und Binnenschiffe für den europäischen Logistikverkehr abgewickelt werden.¹⁷

Tabelle 4: Technische Daten AGRI-Terminal¹⁸

Technische Daten des AGRI-Terminals	
Zulässiger Tiefgang	12,20 Meter
Lagerkapazitäten für Schüttgut	> 550.000 metrische Tonnen
Gedeckter Lagerraum für Stückgut	152.000 Quadratmeter
Freilagerflächen	81.000 Quadratmeter
Anzahl pneumatischer Heber für Getreide und Futtermittel	2
Anzahl Schiffsbelader für Getreide und Futtermittel	3
Anzahl Drehwipkrane	2
Anzahl Brückenkrane	2
Anzahl Hafenmobilkrane	2

¹⁷ Vgl. (6)

¹⁸ Vgl. (9)

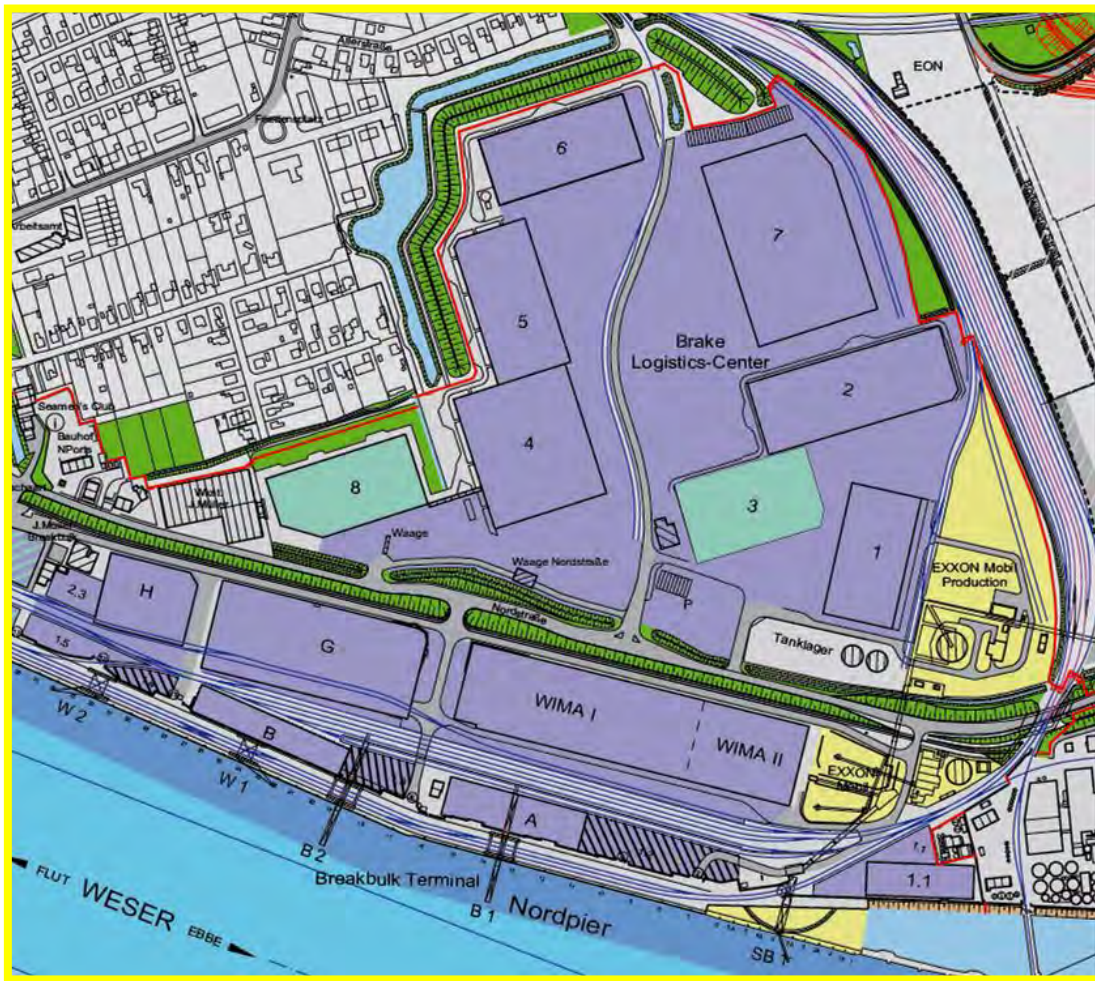


Abbildung 13: Blick auf die Nordpier mit dem Breakbulk Terminal und dem Brake Logistics-Center

Das Brake Logistics Center erstreckt sich auf einer Grundfläche von 25 Hektar. Der multimodal angebundene Komplex ist mit modernen Mehrzweckhallen mit insgesamt 100.000 m² Fläche ausgerüstet. Die befestigten Freilagerflächen sind schwerlastgeeignet. Durch die optimale Anbindung aller Logistikimmobilien an die Terminals und die Ansiedlungsflächen bieten sie die Möglichkeit, verschiedenste Produktgruppen witterungsgeschützt einzulagern und just-in-time für den Versand oder auch für die Produktion bereitzustellen.¹⁹

2.2 Stakeholder der Hafen- und Straßengüterlogistik im Untersuchungsgebiet

Um eine Grundlage für die Dekarbonisierung der Hafen- und Straßengüterlogistik zu bilden, muss zunächst ein Überblick der Akteure geschaffen werden, die an den Prozessen der Hafen- und Straßengüterlogistik partizipieren. Alle Unternehmen die im Folgenden genannt werden weisen einen engen Bezug zur Stadt Brake auf und zeigten großes Interesse an einer

¹⁹ (7)

Beteiligung an dem Projekt H2BrakeCO2. Große Teile der in diesem Gesamtkonzept verarbeiteten Informationen fußen auf den von diesen Unternehmen im Rahmen der methodenbasierten Aufnahme bereitgestellten Informationen und Daten (siehe Kapitel 4). Damit geht auch eine große Verantwortung und Erwartungshaltung für die Umsetzung der im Gesamtkonzept behandelten Maßnahmen einher.

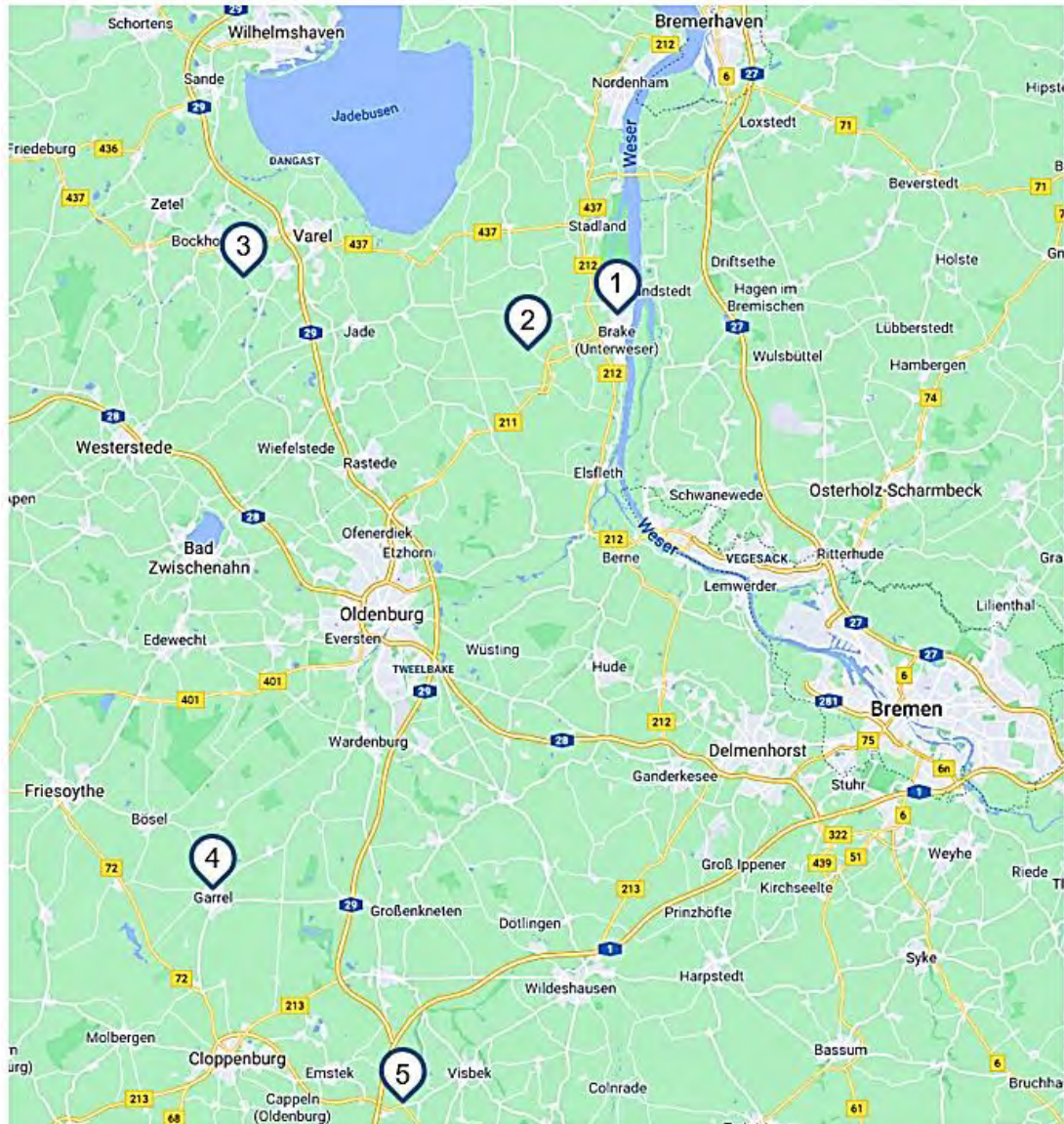


Abbildung 14: Stakeholder der Hafen und Straßengüterlogistik im Untersuchungsgebiet

- 1) Unternehmen im Stadtgebiet Brake
- 2) DMK Deutsches Milchkontor GmbH
- 3) AWE Agrarhandel Weser-Ems GmbH & Co. KG
- 4) Fleming + Wendeln GmbH & Co. KG
- 5) GS Agri eG

Position 1: Unternehmen im Stadtgebiet Brake

Niedersachsen Ports GmbH & Co.KG ist die Gesellschaft für Hafeninfrastruktur mit den meisten öffentlichen Seehäfen in Deutschland. Sie ist verantwortlich für fünf



Seehäfen, sieben Inselversorgungshäfen und drei Regionalhäfen in der niedersächsischen Küstenregion. In den Standorten vermarktet Niedersachsen Ports Gewerbe- und Industrieflächen und siedelt hafenaffine Unternehmen an. Zu den Kernaufgaben gehören Entwicklung, Bau und Instandhaltung der Infrastruktur. Am Standort Brake betreibt Niedersachsen Ports die Hafenbahn und eigene Umschlageinrichtungen. Außerdem wird das Festmachen von Seeschiffen und deren landseitige Versorgung mit Strom und Trinkwasser sowie die Organisation der Schiffsabfallentsorgung übernommen.²⁰



Unter dem Dach einer familiengeführten, mittelständischen Aktiengesellschaft verfügt das Unternehmen J. MÜLLER Weser am Standort Brake über die größte zusammenhängende Siloanlage Europas. Die tägliche Löschleistung liegt bei 20.000 Tonnen. Mit Lagerkapazitäten von 550.000 Tonnen und leistungsfähigen Selbstbedienungsanlagen stellt J. Müller den Abruf von Transporten just in time und flexibel sicher. Zudem bewerkstelligt das Unternehmen als Betreiber Europas größter Schwefelbearbeitungs- und Umschlaganlage den fachgerechten Güterumschlag und die Lagerung von Fest- und Flüssigschwefel sowie von Eisen-II-Chlorid.²¹

Die L.I.T. Gruppe mit Sitz in Brake ist ein Dienstleister für die Abwicklung der kompletten Logistikkette, der angefangen bei Lagerung über Transport und kundenspezifischen Service bis zur termingerechten Anlieferung ein vielfältiges Leistungsspektrum



LOGISTIK • INFORMATION • TRANSPORT

anbietet. An 64 Standorten in 12 Ländern arbeiten über 3.000 Mitarbeiter für das Unternehmen und machen es zu einem der größten Arbeitgeber der Stadt. Im Speditionsbereich der L.I.T. Gruppe verfügt das Unternehmen über 1.100 LKW mit steigender Tendenz, die europaweit im Einsatz sind. Das unternehmensseitige Verantwortungsbewusstsein dem Klimawandel und der Umwelt gegenüber gründet in einem umfangreichen Maßnahmenspektrum, welches sich

²⁰ Vgl. (8)

²¹ Vgl. (10)

der nachhaltigen und ressourcensparenden Ausrichtung der Transportaktivitäten widmet.²²



Der Oldenburgisch Ostfriesische Wasserverband, kurz OOWV, gehört in Deutschland zu den zehn führenden Unternehmen der Wasserwirtschaft und ist

der flächengrößte Trinkwasserversorger der Bundesrepublik. Jährlich reinigt der OOWV 32,5 Milliarden Liter Abwasser und ist daher ein leistungsstarker Ansprechpartner für die Modellierung der Gewinnung alternativer Kraftstoffe auf Basis von Klärschlamm.²³ In diesem Zusammenhang ist das Projekt MULTI-ReUse hervorzuheben, das sich der bedarfsgerechten Wiederaufbereitung und Bereitstellung von Abwasser für industrielle Zwecke widmet. Damit trägt der OOWV zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeiten bei und vermeidet die Nutzung von Trinkwasser für industrielle Zwecke, die eine hohe Reinheit des eingesetzten Wassers benötigen.²⁴ Dazu gehört beispielsweise auch die Wasserstofferzeugung in PEM- und alkalischen Elektrolyseuren.

Olenex Edible Oils GmbH ist ein in Brake niedergelassenes global agierendes Unternehmen mit Sitz in Rolle (CH), welches sich auf die



Herstellung und Raffinerie von Speiseölen spezialisiert hat. Am Standort Brake wird Wasserstoff insbesondere bei der Härtung von Ölen und Fetten in großen Mengen verbraucht. Daher kann auch das Unternehmen Olenex von dem Projekt H2BrakeCO2 profitieren und durch Vergrößerung des Anteils an grünem Wasserstoff im Produktionsprozess zur Verkleinerung des unternehmenseigenen Carbon Footprint beitragen.

Die DB Cargo bündelt die Aktivitäten der Deutschen Bahn im Schienengüterverkehr und ist Eigentümer der Rangierlokomotiven im Braker Hafen.²⁵ Für den CO₂-freien Betrieb von Rangierlokomotiven besteht eine Möglichkeit in dem Einsatz von Wasserstoff und einer Kombination aus batterieelektrischer und brennstoffzellbasierter Antriebstechnologie.



²² Vgl. (11)

²³ Vgl. (12)

²⁴ (94)

²⁵ (26)

Position 2: DMK Deutsches Milchkontor GmbH



Die DMK Deutsches Milchkontor GmbH mit Sitz in Zeven vertreibt als Deutschlands größte Molkereigenossenschaft an über 20 Standorten weltweit über 7,1 Milliarden Kilogramm Milch. Die Milchsammelwagen des Unternehmens fahren die Milchhöfe im gesamten Norddeutschen Raum an und sind rund um die Uhr im Einsatz. Am DMK Baby Standort in Ovelgönne-Strückhausen werden Säuglingsanfangs- und Folgenahrungen hergestellt und vertrieben.²⁶

Position 3: AWE Agrarhandel Weser-Ems GmbH & Co. KG

Die AWE Agrarhandel Weser-Ems GmbH & Co. KG ist ein Produzent diverser Mischfutter, Saaten und Dünger, der stark von der Nähe zum Hafen der Stadt Brake profitiert. Täglich



pendeln Fahrzeuge des unternehmenseigenen Fuhrparks zwischen dem AWE Standort in Varel-Altjührden und der Stadt Brake, um im Hafen die Grunderzeugnisse für die Herstellung der Produkte des Unternehmens abzuholen. Dabei kommen überwiegend LKW mit Siloaufbau zum Einsatz. Aufgrund der vorausschauend planbaren, wiederkehrenden Transportwege und Transportzyklen bietet das Unternehmen AWE Agrarhandel Weser-Ems ideale logistische Voraussetzungen für den Einsatz von Wasserstoff als alternativen Kraftstoff in der Unternehmensflotte.

Position 4: Fleming + Wendeln GmbH & Co. KG



Auch das Unternehmen Fleming + Wendeln GmbH & Co. KG ist ein Produzent diverser Futtermittel und vertreibt diese mithilfe des unternehmenseigenen Fuhrparks. Dabei kommen auch hier LKWs mit Siloaufbau zum Einsatz die täglich zwischen der Niederlassung in Garrel und dem Hafen der Stadt Brake pendeln. Darüber hinaus vermittelt das Unternehmen organische Wirtschaftsdünger über die eigene Gülle- und Festmistbörse und sorgt für einen Düngemittelaustausch von Betrieben mit einem Düngemittelüberschuss zu Unternehmen mit

²⁶ Vgl. (14)

einer Düngemittelunterversorgung.²⁷

Position 5: GS Agri eG

Das Unternehmen GS Agri eG mit Sitz in Schneiderkrug in Niedersachsen ist mit 27 Standorten einer der führenden Mischfutterproduzenten in der Region Weser-Ems. Neben



diesem Kerngeschäft ist die GS Agri eG noch in den Geschäftsbereichen Energie und Brennstoffe, Baustoffe, Landwirtschaftsbedarf sowie Haus- und Gartenmärkte tätig.²⁸ Der Hafen der Stadt Brake ist mit seinem AGRI-Terminal ein wichtiger Knotenpunkt im Transportnetz des Unternehmens, was die GS Agri zu einem starken Projektpartner für H2BrakeCO2 macht.

2.2.1 Einflussbereich der Hafen- und Straßengüterlogistik

Ein großer Faktor im von der Stadt Brake ausgehenden Transportaufkommen ist der Getreide- und Futtermittelumschlag im Braker Hafen. Viele der zuvor genannten Unternehmen fahren den Braker Hafen im Pendelbetrieb an, verarbeiten die Rohstoffe in ihren Niederlassungen und beliefern dann eine Vielzahl von Vieh- und Landwirtschaftsbetrieben in der Metropolregion Nordwest. Darüber hinaus ist ein Automobilzulieferer in der Stadt Brake niedergelassen, von dem ausgehend die Produktionsstätten von Mercedes-Benz in Bremen und Volkswagen in Wolfsburg in regelmäßigen Abständen mehrmals täglich angefahren werden. Ein Großteil dieser Pendelverkehre im Nahverkehr hat gemein, dass die zurückgelegten Strecken pro Tour selten über 150 Kilometer hinausgehen. Dadurch ließen sich brennstoffzellenbetriebene LKW, soweit diese von den betreffenden Unternehmen eingesetzt werden würden, bereits über einen Tankstellenstandort in der Stadt Brake mit Wasserstoff versorgen. Das sog. „Henne-Ei-Problem“ wäre damit in Brake nicht existent bzw. wäre die Umsetzung vieler Anwendungsfälle der ansässigen Unternehmen ohne die Abhängigkeit vom intensiven (bundesweiten) Ausbau des H2-Tankstellennetzes direkt machbar.

²⁷ Vgl. (15)

²⁸ (27)

3 Aufnahme des Ist-Zustandes

In der Aufnahme des Ist-Zustandes wird das Untersuchungsgebiet auf seine Eignung für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur untersucht. In einem ersten Schritt soll der Input erneuerbarer Energien in der Wesermarsch quantifiziert und analysiert werden. Neben dem Ausbau erneuerbarer Energien bedarf es für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur an geeigneten Flächen für die Installation potentieller Erzeugungs- und Speicherkapazitäten. Diese sollen in einem zweiten Schritt identifiziert und lokalisiert werden.

3.1 Input Erneuerbarer Energien im Untersuchungsgebiet Wesermarsch

Im vorliegenden Abschnitt 3.1 werden für den Landkreis Wesermarsch mit der Stadt Brake und weiteren 8 Gemeinden die im jeweiligen Umfeld angesiedelten aktuellen Produktionseinrichtungen und Produktionskapazitäten für grünen Strom aus erneuerbaren Energien (Wind, Solarenergie und Bio-Gas-Anlagen) analysiert und dargestellt.

Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der grünen Energiemengen, welche kurzfristig, mittelfristig und langfristig zur Wasserstoff-Produktion bereitgestellt werden können, ggf. auch unter Berücksichtigung von WEAs mit weiterentwickelten Leistungsdaten (im Bau befindlich oder für zukünftige Errichtung geplant).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die momentane Stromproduktion aus Erneuerbaren Energiequellen in der gesamten Wesermarsch eine Größenordnung erreicht, welche sich folgendermaßen quantifizieren lässt:

- Ein Mehrfaches des Stromverbrauchs in allen Haushalten der Wesermarsch sowie
- Ein beträchtlicher Anteil des gesamten Stromverbrauchs in der Wesermarsch könnte bilanziell aus Erneuerbaren bereitgestellt werden.

Teile der in diesem Kapitel erarbeiteten Inhalte werden in anderen Kapiteln dieses Gesamtkonzepts zur Beantwortung weiterer Fragestellungen herangezogen werden. Darunter fallen unter Anderem:

- Auswahl von Standorten und zugehörige Kriterien für die Installation von Elektrolyseuren (mit den erforderlichen Leistungsdaten) zur Produktion von grünem Wasserstoff,

- Bereitstellung (Produktion, Speicherung und Transport) von grünem Wasserstoff für Logistikprozesse im Hafen und den Straßengütertransporten und Versorgung dieser Einrichtungen mit grünem Strom.
- Erzielbare THG-Einsparungen im Vergleich zum Einsatz konventioneller Technologien/Energieträgern (nicht CO₂ frei)

Die geplante wasserstoffbasierte Energieinfrastruktur (basierend auf grünem Strom aus Erzeugungsanlagen für erneuerbare Energien (Wind, Solar/Photovoltaik, Biogasanlagen, Wasserkraft) und weiterführend auch auf synthetischen Kraftstoffen aus grünem Strom/Wasserstoff

- zum Betrieb der technischen Einrichtungen im Hafen (Güterumschlag, Fördereinrichtungen, hafeninterner Schiffsverkehr, Landstromversorgung)
- zur Versorgung von Transportfahrzeugen zum Weitertransport der Umschlaggüter und allgemeiner Mobilität im Zusammenhang mit Aktivitäten im Hafen
- zur Bereitstellung von Wasserstoff für wasserstoffintensive Industrien mit großem Wasserstoffbedarf im Hafenumfeld (Bsp. Fettverarbeitung/Veredelung)

soll dazu beitragen, eine signifikante Reduzierung der CO₂-Belastung bzw. der Treibhausgasemissionen der Umwelt zu erzielen. Dazu sind geeignete Infrastrukturen mit den erforderlichen technischen Einrichtungen zu planen, bereitzustellen und mit vorhandenen Infrastrukturen zusammenzuschalten.

Die Grenzen des Untersuchungsgebiets für die Betrachtung des Inputs Erneuerbarer Energiemengen orientieren sich formal an den Verwaltungsgrenzen der Wesermarsch. Diese Eingrenzung des Betrachtungshorizonts sollte lediglich die dedizierte Betrachtung einer festen Anzahl erneuerbarer Erzeugungsanlagen in einem klar abgegrenzten Gebiet ermöglichen. Der Wirkungsbereich des Projekts H2BrakeCO₂ und auch die Kooperation und Vernetzung mit Unternehmen und weiteren Wasserstoffinitiativen endet keineswegs an den Verwaltungsgrenzen der Wesermarsch. Ferner ist eine Verwaltungsgrenze im Hinblick auf die Bewertung von erneuerbaren Erzeugungsanlagen eine willkürliche Grenze. Dies spiegelt sich insbesondere in der Tatsache wider, dass zur Deckung des Wasserstoffbedarfs der untersuchten Prozesse auch die Zulieferung von Wasserstoff aus Produktionsanlagen außerhalb des Untersuchungsgebiets erwägt werden muss.

Das vorliegende Kapitel 3.1 hat die wesentliche Aufgabe, den Istzustand der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien (Wind, Solar, Bio) in der Wesermarsch darzustellen. Darunter ist die Erfassung aller Energieerzeugungsanlagen mit folgenden zugehörigen dem Marktstammdatenregister entnommenen Stammdaten zu verstehen:

1. Energiequelle (Wind, Solar, Bio, Wasser)
2. Leistungsdaten (Nennleistung Netto/Brutto)
3. Standort (postalische Angaben und Geo-Daten)
4. Bezeichnung der Anlage (Windpark xxx, etc.)
5. Betreiber der Anlage
6. Netzübertragungsbetreiber
7. Anmeldungsdatum
8. Datum der Inbetriebnahme
9. Datum der Registrierung (und letzten Änderung)
10. und weitere Angaben

Stammdaten sind Parameter, welche sich über die Laufzeit nicht ändern und im sogenannten Marktstammdatenregister erfasst und einsehbar sind. Parameter wie z.B. Betreiber der Anlage oder Netzübertragungsbetreiber können sich bei Übergabe an einen anderen Betreiber ändern und müssen im Register umgehend angepasst werden. Damit zählen auch solche Angaben zu den Stammdaten.

Im Marktstammdatenregister werden alle Energieerzeugungs- und Verbrauchsanlagen bundesweit sowohl für erneuerbare als auch für konventionelle Energien zentral erfasst. Der Betreiber einer Anlage hat eine Registrierungspflicht und ist für die Registrierung verantwortlich. Der Übertragungsnetzbetreiber (ÜBN) übernimmt die Überprüfung, die Bundesnetzagentur bestätigt die EEG-Fähigkeit der Anlage (Berechtigung zur Beanspruchung von EEG-Zahlungen).

Weitere Parameter (nicht Stammdaten)

1. **Gesamte Energieerzeugung** im Referenzjahr oder eine Zeitreihe aus mehreren Jahren (dokumentiert durch Übertragungsnetzbetreiber)
2. **Qualitative Angaben:**
 - a. Parameter, welche erforderlich sind zur Beurteilung der Eignung einer Anlage für die Erzeugung von grünem Wasserstoff,
 - b. Entfernung vom Hafen Brake zur Beurteilung der Transportmöglichkeiten
 - c. Windbedingungen
 - d. Verkehrsanbindung, Rohrleitungsanlagen für Transportzwecke
 - e. Möglichkeiten zur Gestaltung von Infrastruktureinrichtungen (mechanisch, elektrisch, Regelung, Messung), Datenverarbeitungs- und Übermittlungsanlagen

- f. Erzeugung, Lagerung und Transport von Wasserstoff, etc.
- g. bestehende Verträge, bautechnische Vorgaben, etc.
- h. juristische Randbedingungen und Vorgaben
- i. Feedback aus Bürgerbeteiligungen bei Projektvorstellung und Genehmigungsvorgängen

Zur Beschreibung des Istzustandes der Energiesituation gehört ebenfalls eine Erläuterung des Istzustandes der gesetzlichen Vorgaben (aktuelle und ältere EEG-Gesetze, kurz/mittel- und langfristige Bestimmungen) zur Erreichung der Klimaziele und geplante Änderungen (daraus leiten sich die Randbedingungen zur Förderung von EEG-Anlagen ab).

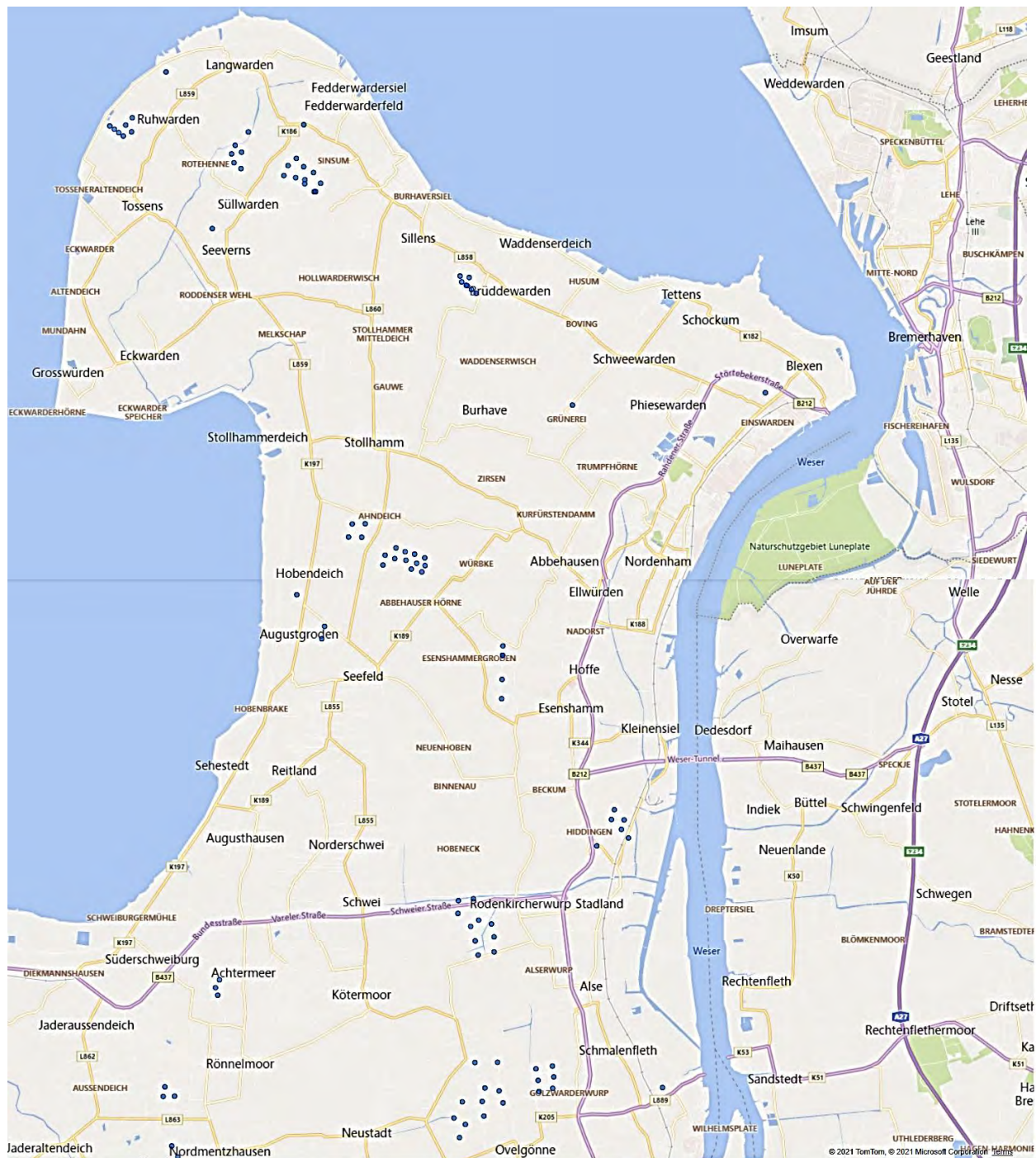
Neue Energiekonzepte und Systeme werden zur Erreichung der übergeordneten Klimaziele und Versorgungssicherheit alte Systeme ablösen und/oder ergänzen. Zur Beurteilung und Optimierung der Durchführung der Ersatzmaßnahmen gehört somit auch die Erfassung und Beschreibung der konventionellen Energieerzeugungsanlagen (Energieart, Leistungs- und Erzeugungsdaten).

In die Auswertungen sind die Daten einer Vielzahl von Datenlieferanten eingeflossen (unter anderem EWE Auswertungen, MaStR, etc.). Energieversorger sind gehalten, die jährlichen kumulativen produzierten Strommengen aus EEG-Anlagen und anderen Anlagen zu publizieren.

3.1.1 Erzeugter Strom aus Erneuerbaren Windenergie-, Solar- und Biogasanlagen in der Wesermarsch

Standorte der Windenergieanlagen in der Wesermarsch

Die folgende Geovisualisierung zeigt die Standorte der Windenergieanlagen in der Wesermarsch basierend auf die zugehörigen Koordinaten aus dem Marktstammdatenregister. Die Aktualisierung dieser Eintragungen ins MaStR obliegt dem Anlagenbetreiber. Eine Qualitätskontrolle durch den ÜBN (Übertragungsnetzbetreiber) findet ggf. nur bedingt statt, daher sind solche Angaben auch nur bedingt für belastbare Aussagen verwertbar. Eine Tabelle mit den zugrundeliegenden Daten aus dem MaStR ist als Anhang I dem Gesamtkonzept beigelegt.



²⁹ Eigene Darstellung nach Marktstammdatenregister

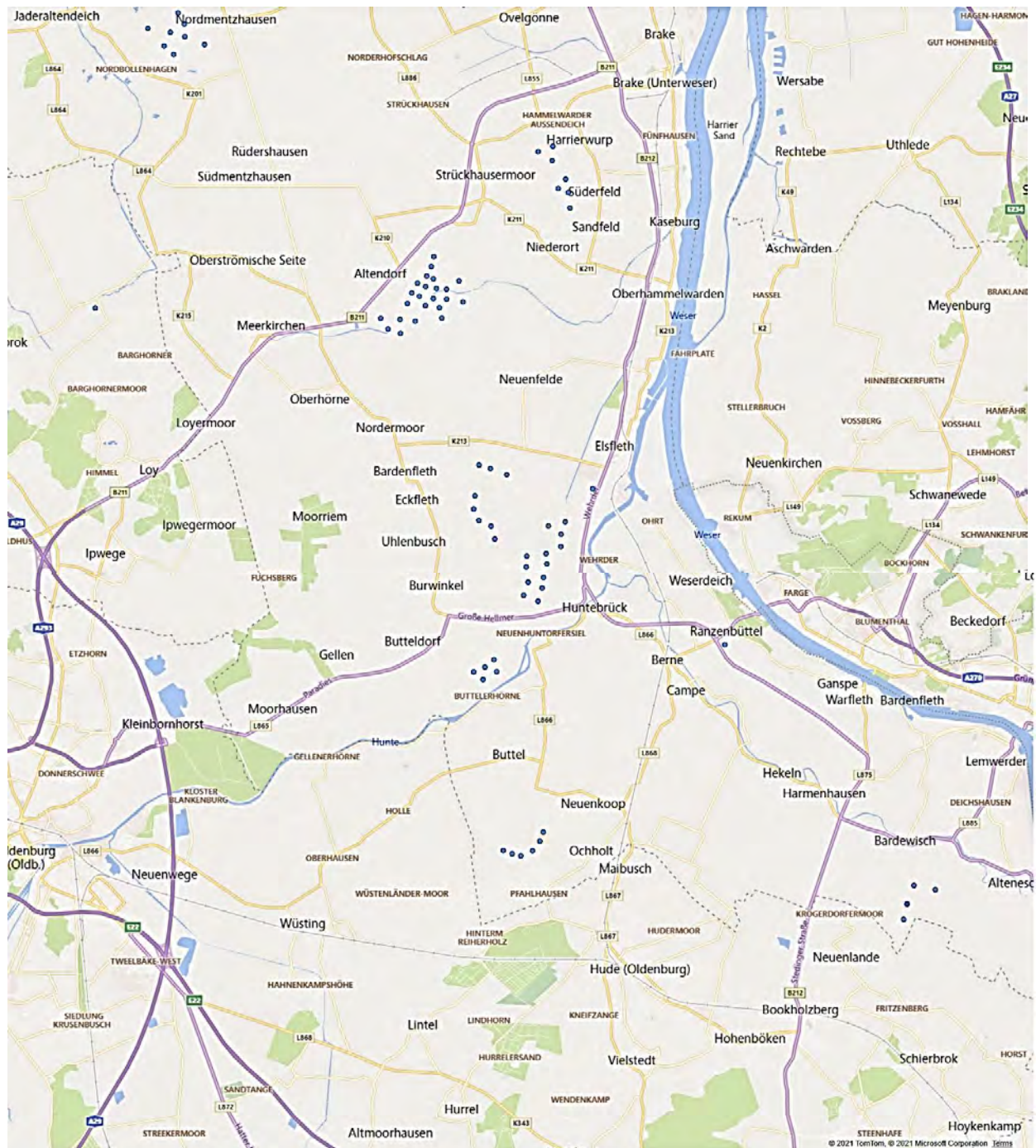


Abbildung 16: Lage der Windenergieanlagen in der Wesermarsch (südlicher Teil)³⁰

³⁰ Eigene Darstellung nach Marktstammdatenregister

Tabelle 5: Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Einzugsgebiet Brake³¹

	Anzahl Anlagen			Installierte Leistung (MW)			Erzeugte Energie/Jahr (MWh/a), 2018		
	WEA	PV	Bio	WEA	PV	Bio	WEA	PV	Bio
Brake	15	254	2	40,00	4,70	0,60	77.800	3.859	1.898
	Gesamt-Anzahl Anlagen			Gesamte Leistung			Gesamte erzeugte Energie/Jahr (MWh/a), 2018		
	271			45			83.557		

Tabelle 6: Mögliche Versorgung von Haushalten in Brake mit erneuerbaren Energien aus dem Umfeld³²

Stadt Brake Einwohner (2019)			15.319		
Annahme: Durchschnittliche Anzahl an Personen pro Haushalt			3		
Anzahl Haushalte			5.106		
Annahme durchschnittlicher Energiebedarf pro Haushalt und Jahr (kWh)			3000		
Mit der Energie Produktion aus Erneuerbaren Energiequellen im Umfeld von Brake					
in der Größenordnung von			83.557	MWh pro Jahr	
könnte eine Anzahl von			27.852	Haushalten	
mit Strom versorgen					

Tabelle 6 zeigt die bilanziell mögliche Versorgung von Haushalten in Brake mit Grünstrom. Aus ihr geht hervor, dass mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Umfeld von Brake eine Anzahl von 27.852 Haushalten versorgt werden könnte, welche der 5-fachen

³¹ Eigene Darstellung nach (23)

³² Eigene Darstellung nach (23)

Anzahl an Haushalten in Brake entspricht.

Tabelle 7: Durchschnittsleistungen und Volllaststunden der erneuerbaren Energiequellen in Brake und Umgebung³³

Durchschnittsleistung alle WEA	2,6667 MW
Durchschnittliche Volllaststunden aller WEA	1945 h
Durchschnittsleistung aller Bio-Anlagen	0,3 MW
Durchschnittliche Volllaststunden der Bio Anlagen	3163,3 h
Durchschnittsleistung aller PV Anlagen	18,504 kW
Durchschnittliche Volllaststunden PV Anlagen	821,06 h

Tabelle 8: Stromproduktion in den neun Gemeinden der Wesermarsch aus erneuerbaren Energiequellen³⁴

	Anzahl Anlagen			Installierte Leistung (MW)			Erzeugte Energie/Jahr (MWh/a), 2018		
	WEA	PV	Bio	WEA	PV	Bio	WEA	PV	Bio
Berne	7	146	6	14,00	2,60	2,70	26.558	2.053	16.341
Brake	15	254	2	40,00	4,70	0,60	77.800	3.859	1.898
Butjadingen	53	340	3	81,00	5,30	1,40	172.488	4.473	8.026
Elsfleth	19	286	4	35,00	6,00	8,00	45.527	4.589	46.746
Jade	15	215	1	36,00	3,60	0,70	68.205	2.703	107
Lemwerder	6	107	1	19,00	2,30	0,70	60.513	1.873	627
Nordenham	9	582	4	11,00	12,70	1,70	20.441	11.603	8.927
Ovelgönne	39	234	2	118,00	8,30	0,37	230.828	7.611	2.832
Stadland	20	360	2	37,00	6,40	0,80	47.746	576	5.878
Gesamt	183	2524	25	391	52	17	750.106	39.340	91.382
	Gesamt-Anzahl Anlagen			Gesamte Leistung (MW)			Gesamte Erzeugte Energie/Jahr (MWh/a), 2018		
	2.732			460			880.828		

³³ Eigene Darstellung nach (23)

³⁴ (23) [modifiziert]

Tabelle 9: Durchschnittsleistungen in der Wesermarsch aus erneuerbaren Energiequellen³⁵

Durchschnittsleistung alle WEA	2,1366 MW
Durchschnittliche Volllaststunden aller WEA	1918,4 h
Durchschnittsleistung aller Bio-Anlagen	0,6788 MW
Durchschnittliche Volllaststunden alle Bio Anlagen	5384,9 h
Durchschnittsleistung aller PV Anlagen	20,563 kW
Durchschnittliche Volllaststunden PV Anlagen	758 h

Tabelle 10: Mögliche Versorgung von Haushalten in der Wesermarsch mit Erneuerbare Energiequellen³⁶

Wesermarsch Einwohner (2019)			89.000		
Annahme: Anzahl Personen pro Haushalt			3		
Anzahl Haushalte			29.667		
Annahme Verbrauch pro Haushalt und Jahr (kWh)			3000		
Mit der Energie Produktion aus Erneuerbaren in der Wesermarsch					
in der Größenordnung von			880.828	MWh pro Jahr	
könnte man eine Anzahl von			293.609	Haushalten	
mit Strom versorgen					

Tabelle 10 zeigt die bilanziell mögliche Versorgung von Haushalten in der Wesermarsch mit grünem Strom. Aus ihr geht hervor, dass mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in der Wesermarsch eine Anzahl von 293.609 Haushalten versorgt werden könnte, welche der 10-fachen Anzahl der Haushalte in der Wesermarsch entspricht. Die relativ großen Zahlenwerte der installierten Gesamtleistungen (Nennleistungen) der Wind- und Solaranlagen sind mit Vorsicht zu betrachten. Die tatsächlichen erzielbaren Leistungen über

³⁵ Eigene Darstellung nach (23)

³⁶ Eigene Darstellung nach (23)

die Zeit ermittelt unterliegen beträchtlichen Schwankungen (Wetterbedingungen, Windverhältnisse, Stillstände). Die Nennleistungen sind die Auslegungsleistungen für Dauerbetrieb bei entsprechenden Randbedingungen (Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung etc.).

Für WEAs liegen die im Betrieb ermittelten mittleren Dauerleistungen zum Teil nur bei einem Drittel der Nennleistungen, obwohl WEAs bis zu 75% der theoretisch möglichen Jahresbetriebsstunden (8760 h) mit den angedeuteten Leistungsschwankungen in Betrieb sein können.

Gesamtbedarf an elektrischer Energie in der Wesermarsch

Um den mit erneuerbaren Energien bilanziell abdeckbaren Energiebedarf in der Wesermarsch darzustellen, bedarf es einer Übersicht aller Energieverbraucher und den von ihnen verbrauchten jährlichen Energiemengen. Diese sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Gesamtbedarf an elektrischer Energie in der Wesermarsch (2018)³⁷

Energieart	Verbraucher	Verbrauch (GWh)
Elektrische Energie	Zinkhütte (Großverbraucher)	644
Elektrische Energie	Landwirtschaft Milchviehhaltung	28
Elektrische Energie	Haushalte	111
Elektrische Energie	Premium Aerotec, Nordenham	63
Elektrische Energie	Kronos Titan, Nordenham	61
Elektrische Energie	NSW GmbH	9
Elektrische Energie	Andere	254
	Summe elektrischer Energie	1.170

Aus Tabelle 8 und Tabelle 11 geht hervor, dass 75,3 % der in der Wesermarsch verbrauchten elektrischen Energie durch die in der Wesermarsch produzierte erneuerbare Energiemenge gedeckt werden könnte. Aus diesem Ergebnis lässt sich die Erkenntnis schlussfolgern, dass selbst eine Region wie die Wesermarsch mit einem starken Ausbau erneuerbarer Energieanlagen und einer relativ niedrigen Bevölkerungsdichte ihren Energiebedarf noch nicht vollständig aus erneuerbaren Energien decken kann.

Durch die bis zum Jahr 2045 angestrebte CO₂-Freiheit der Bundesregierung und der damit einhergehenden Sektorenkopplung mittels grünen Wasserstoffes wird der Strombedarf künftig ansteigen und einen starken Ausbau erneuerbarer Energieanlagen nach sich ziehen. Eine von der Agora Energiewende und der Stiftung Klimaneutralität in Auftrag gegebene Studie³⁸ nimmt

³⁷ Eigene Darstellung nach (23), S. 6 Abb. 4

³⁸ Vgl.: (43), S 16

an, dass der jährliche Stromverbrauch in Deutschland von 2030 bis 2045 vor allem durch die weitere Elektrifizierung sowie die steigende Herstellung von Wasserstoff um 60 Prozent auf etwa 1.000 Terawattstunden ansteigen wird. Die im Jahr 2045 benötigte installierte Leistung von Photovoltaikanlagen beträgt 385 Gigawatt. Für Windenergie an Land ist im Jahr 2045 eine Erzeugungskapazität von 145 Gigawatt erforderlich, und der Ausbau von Windenergie auf See auf 70 Gigawatt muss auf das Jahr 2045 vorgezogen werden.

Gleichzeitig muss das Stromnetz weiter ausgebaut und durch modernen Speichertechnologien unterstützt werden, da die Verteilernetzbetreiber bereits bei der heutigen Ausbaustufe erneuerbarer Energien genötigt sind erneuerbare Erzeugungsanlagen über das Einspeisemanagement abzuregeln, um das Stromnetz vor Überlastungen zu schützen.

3.1.2 Abgeregelter Energiemengen in Niedersachsen und der Wesermarsch

Unter der sogenannten Abregelung werden Eingriffe durch den Übertragungsnetzbetreiber verstanden, die zur Folge haben, dass die Leistungen einzelner Anlagen vollständig auf Null abgeregelt oder eine Gruppe von Anlagen in der Leistung heruntergeregelt werden, um durch die Drosselung der Einspeisung ins Netz eine Netzüberlastung zu verhindern. Da die Erneuerbaren Vorrang bei der Einspeisung haben, ist die Abregelung die am wenigsten favorisierte Maßnahme, wenn alle anderen möglichen Maßnahmen als nicht-zielführend bei der Behebung des Netzengpasses in Frage kommen. Oberste Priorität bei den Entscheidungen ist die Aufrechterhaltung der Netzsicherheit und der Stromversorgung.

Bei der Entscheidung, welche Anlagen im Bedarfsfall abzuregeln sind, sind die technischen Mitarbeiter nicht an wirtschaftliche Kriterien gebunden. Der Betreiber wird für die nichtproduzierten Strommengen entschädigt, somit ist hier möglichen juristischen Konsequenzen vorgebeugt.

Dieser Vorgang wird Einspeisemanagement (*EinsMan*) genannt.

Die tatsächlich vorgenommen Abregelungen (Zeitpunkt, Dauer, nicht erzeugte Energiemengen) sind über Datenbanken nachvollziehbar. Die genaue Erfassung würde Zugriffsrechte auf große Datenmengen aus einem großen Datenpool erfordern.

Daher werden die nicht erzeugten Strommengen im Folgenden aus kumulativen Angaben der Bundesnetzagentur für die Bund und Länder konservativ abgeschätzt. Die Bundesnetzagentur veröffentlicht jährlich die aktuellen Zahlen zu folgendem Material:

- Historische Entwicklung der installierten Leistung, der eingespeisten Jahresarbeit und der Zahlungen nach dem EEG

- Durchschnittliche Zahlungen nach dem EEG
- Regionale Verteilung
- Verteilung nach Spannungsebenen und Größenklassen
- Umlagepflichtige Strommengen
- Zubau zur Berechnung der Zahlungsansprüche
- Ergebnisse der Ausschreibungen nach dem EEG
- Einspeisemanagement

Zugleich ist es berechtigt, folgende Frage zu stellen:

1. Was hätte mit dem nicht erzeugten Strom produziert werden können, wenn (sofern technisch möglich) der Strom unter veränderten Randbedingungen hätte erzeugt und eingespeist werden können?

Die Antwort darauf lässt sich über folgende Tabellen der Bundesnetzagentur ermitteln.

Tabelle 12: Entwicklung der Ausfallarbeit (nach § 14 EEG) nach Erneuerbaren Energieträgern (in GWh)³⁹

Energieträger	2010	2017	2018
Windenergie (an Land und auf See)	125	5287	5246
Solare Strahlungsenergie	1,6	163	116
Biomasse	0,0	61	35
Wasserkraft	0,0	2,7	0,1
Deponie- & Grubengas	0,0	0,8	0,6
Anlagen nach dem KWKG ¹⁾	0,1	2,7	2,5
Insgesamt	137	5,518	5,403
% Veränderung zum Vorjahr	0,0	47%	-2%
Anteil an der eingespeisten Jahresarbeit	0,2%	2,9%	2,8%

¹⁾ KWKG Kraft-Wärme-Kopplung

Tabelle 13: Überblick erneuerbare Energieträger nach Bundesland: (Anlagenanzahl, Installierte Leistung, eingespeiste Jahresarbeit, am 31.12.2018)⁴⁰

Bundesland	Anzahl Anlagen	Installierte Leistung MW	Jahresarbeit GWh
Niedersachsen	171.327	16974,9	31.746,2
Nordrhein-Westfalen	269.726	11.890,7	19.286,1
Schleswig-Holstein	51.226	8.918,9	15.298,8
Saarland	23.930	1.005,9	1.644,6
BRD Gesamt	1.812.279	114.111	195.368

Tabelle 14 zeigt einen Auszug aus dem Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen im Gesamtjahr 2018. Über die darin enthaltenen

³⁹ Vgl.: (37)

⁴⁰ Vgl.: (37)

Ausfallarbeiten lassen sich zusammen mit den Angaben zur Jahresarbeit in Tabelle 13 Rückschlüsse auf die in der Wesermarsch abgeregelten Energiemengen ziehen.

Tabelle 14: Verteilung der EinsMan-Maßnahmen im Gesamtjahr 2018 nach ausgewählten Bundesländern⁴¹

Bundesland	Ausfallarbeit in GWh	Prozentualer Anteil der gesamten Ausfallarbeit (alle Bundesländer)	Entschädigungsansprüche (geschätzt), Euro	Prozentuale Verteilung der Entschädigungsansprüche
Niedersachsen	1.518	28,1%	249.713.000	46,3%
Nordrhein-Westfalen	228	4,2%	17.015.000	2,7%
Schleswig-Holstein	2860	52,9%	294.440.000	46,3%
Saarland	-	-	-	-
BRD Gesamt	5402	100%	635.437.000	

Die durchschnittlich gezahlte Entschädigung betrug 2018 auf Bundesebene ca. 0,12 € und in Niedersachsen ca. 0,16 € pro kWh

Bei einer Gesamtproduktion von 31.746,2 GWh in Niedersachsen im Jahr 2018 aus erneuerbaren Energiequellen wurden 1.519 GWh abgeregelt. Für das Jahr 2018 ergibt sich aus den zuvor genannten Werten für alle erneuerbaren Energieanlagen in Niedersachsen eine Abregelung von 4,8 % des eingespeisten Ertrags auf Grund von EinsMan.

Übertragen auf die Gesamtproduktion von ca. 880.828 MWh aus allen erneuerbaren Energieanlagen im Jahr 2018 in der Wesermarsch (siehe Kapitel 3.1.1) beträgt die Ausfallarbeit durch Abregelung für die gesamte Wesermarsch 42,28 GWh. Für die erzeugte Energiemenge aus Windenergieanlagen in der Wesermarsch im Jahr 2018 von 750.106 MWh (siehe Kapitel 3.1.1) beträgt die Ausfallarbeit 36,01 GWh.

Hinweis:

Je nach Quellenlage, Datum der Datenerfassung, Datum der Veröffentlichung der Resultate gelangt man zu unterschiedlichen Ergebnissen mit Abweichungen, welche den genannten Ursachen zuzuordnen sind.

Auch zeigt sich bei Betrachtung der Zeitreihen, dass die Ausfallarbeiten durch Abregelung in der eine Schwankungsbreite zwischen 2 und 4% aufweisen können. Mit zunehmendem Netzausbau ist als Trend zu erwarten, dass die Ausfallarbeit prozentual als Anteil der Gesamtproduktion aus Erneuerbaren zurückgeht. Die Schwankungen der Absolutwerte ist unter anderem auf Effekte wie ertragsschwache Windjahre zurückzuführen.

⁴¹ Vgl.: (38)

Mit der berechneten abgeregelten Energiemenge aus Windenergieanlagen von 36,01 GWh könnten:

Rund **12.003 Haushalte** in der Wesermarsch ein ganzes Jahr mit elektrischer Energie versorgt werden,

- wenn ein Energiebedarf von 3000 kWh pro Jahr und Haushalt zugrunde gelegt wird,

oder **15.004 Elektro-PKW** ein Jahr lang mit Strom versorgt werden,

- wenn mit einer für E-Autos eher hohen aber insgesamt nicht unüblichen Jahresfahrleistung von 12.000 km und einem deutlich über den Zyklusangaben liegenden, realistischen Stromverbrauch von 20 kWh/100 km bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) gerechnet wird.⁴²

oder **7144 Wasserstoff-PKW** ein Jahr lang mit Wasserstoff versorgt werden,

- wenn der Energiebedarf zur Erzeugung eines Kilogramms Wasserstoff von ca. 50 kWh⁴³ und der Wasserstoffbedarf von den beiden am Markt verfügbaren PKW-Modellen Toyota Mirai⁴⁴ und Hyundai Nexa⁴⁵ von gemittelt 0,84 kg/100km zugrunde gelegt werden.

3.2 Exkurs in das EEG

Das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, besser bekannt unter dem Namen Erneuerbare-Energien-Gesetz, kurz EEG verfolgt in seiner Fassung von 2021 gemäß § 1 nachfolgenden Zweck beziehungsweise nachfolgende Ziele:

(1) Zweck dieses Gesetzes ist es, insbesondere im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.

(2) Ziel dieses Gesetzes ist es, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch auf 65 Prozent im Jahr 2030 zu steigern.

(3) Ziel dieses Gesetzes ist es ferner, dass vor dem Jahr 2050 der gesamte Strom, der im Staatsgebiet der Bundesrepublik Deutschland einschließlich der deutschen ausschließlichen

⁴² (39)

⁴³ (40)

⁴⁴ (41)

⁴⁵ (42)

Wirtschaftszone (Bundesgebiet) erzeugt oder verbraucht wird, treibhausgasneutral erzeugt wird.

(4) Der für die Erreichung der Ziele nach den Absätzen 2 und 3 erforderliche Ausbau der erneuerbaren Energien soll stetig, kosteneffizient und netzverträglich erfolgen.⁴⁶

Für die Betrachtungen in diesem Kapitel sind die jeweils in den aktuellen Gesetzesvorlagen formulierten Ziele und Bestimmungen für neu zu errichtende Anlagen zur Produktion erneuerbarer Energie relevant (Zubauvolumen, Förderrichtlinien, EEG-Umlage, Dauer, Mechanismus der sinkenden Beträge über die Zeit) und Höhe der Förderungen für Erzeuger, etc).

Daher wird im Folgenden auf die neuen Rahmenbedingungen hingewiesen. Zur Klärung von Detailfragen wird auf das Studium der gesamten Gesetzesvorlage verwiesen.

Die EEG-Gesetzgebung wird seit 20 Jahren fortgeschrieben und in Deutschland ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) seit mehr als 20 Jahren eine zentrale Grundlage für den Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor.

Das aktuelle Gesetz ist das **EEG 2021** und ersetzt das EEG-Gesetz 2017 durch ein grundlegend novelliertes Gesetz.

Wie bei Gesetzestexten üblich, handelt es sich um eine detaillierte Auflistung der Textpassagen, welche

- Neu hinzugekommen sind
- Gestrichen wurden
- Geändert wurden

Für komplexe juristische Betrachtungen müsste der Leser sämtliche bisher veröffentlichten Gesetzestexte im Auge behalten, da jeder neue Gesetzestext auf die Texte in den vorausgegangenen Gesetzen verweist.

Daher wird an dieser Stelle in sehr kompakter Darstellungsweise nur auf die als relevant erachteten Änderungen hingewiesen, wobei maßgebliche Verordnungen (auch aus alten Gesetzen) nicht unerwähnt bleiben.

Hinweis: Jedes der vorausgegangenen Gesetze ist jeweils mit einer zeitlichen Dauer der Verfügungen ausgestattet, um für die Planer und Betreiber von Anlagen eine Planbarkeit der

⁴⁶ (68)

Investitionen sicherzustellen (Beispiel: Festschreibung der finanziellen Förderung für eine gewisse Anzahl von Jahren (Beispiel: 20 Jahre).

Wichtig:

Die geltenden Regelungen für bereits bestehend EEG-Anlagen verlieren in der Regel durch neue Gesetzgebung nicht ihre Gültigkeit, Ausnahmen von dieser Regel sind in wohlbegründeten Fällen jedoch möglich. Der Förderzeitraum beträgt weiterhin 20 Jahre ab Beginn der Inbetriebnahme.

Die Weiterverwendung und der Weiterbetrieb der Altanlagen nach Auslaufen der 20-Jahre garantierten Förderung unterliegt der unternehmerischen Initiative der Betreiber (Stichwort: Direktvermarktung und Direktvermarkter). Ausnahmeregelungen von Seiten des Gesetzgebers zur bedingten Weiterförderung werden diskutiert.

Aus rechtlicher Sicht steht dem Weiterbetrieb nichts entgegen, sofern die Standsicherheit der Anlagen nachgewiesen wird. Die Regelungen des EEG bleiben auch für den Betrieb nicht (mehr) geförderter Windturbinen anwendbar: Der Netzanschluss wird weiterhin gewährleistet, wie auch die physikalische Abnahmepflicht des erzeugten Stroms durch den Netzbetreiber. Dies schließt auch die finanzielle Entschädigung im Fall von Einspeisemanagementmaßnahmen ein.⁴⁷

Zusammenfassung der Zielvorgaben aus dem EEG 2021

Hinweis: Es wird im Gesetzestext darauf verwiesen, dass numerische Angaben (wie Zeitangaben zur Erreichung bestimmter Ziele wie Ausbaukorridore oder Durchführung von Ausschreibungsverfahren durchaus den erforderlichen Aktualisierungen und Anpassungen an neue Gegebenheiten unterliegen können.

Das EEG-Gesetz befasst sich mit dem Zahlenwerk und die Ausführungsbestimmungen rund um die erneuerbaren Energien (Ausbauziele, Ausschreibungen, Förderhöhen, Förderdauer, etc.) als wichtigen Baustein zur Erreichung der Klimaziele, während das Klimaschutzgesetz das Vorhaben der Erreichung der Klimaschutzziele in seiner gesamten Komplexität betrachtet.

Die wichtigsten Inhalte des EEG 2021 gliedern sich in sechs Komplexe:

1. **Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität:** Im EEG 2021 wird das Ziel verankert, dass der gesamte Strom in Deutschland vor dem Jahr 2050 treibhausgasneutral ist. Dies gilt sowohl für den hier erzeugten Strom als auch für den hier verbrauchten Strom.

⁴⁷ (67), S.7

Auch Stromlieferungen nach Deutschland müssen treibhausgasneutral sein, wenn die Europäische Union insgesamt das Ziel der Treibhausgasneutralität erreichen will.

2. **Umsetzung des „Klimaschutzprogramms 2030“:** Die erneuerbaren Energien sollen im Jahr 2030 65 Prozent des deutschen Stromverbrauchs bereitstellen. Damit dieses wichtige Zwischenziel auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität erreicht werden kann, werden mit dem EEG 2021 zentrale Weichen gestellt. So legt dieses Gesetz das Zielmodell des Klimaschutzprogramms 2030 verbindlich fest und regelt, in welchem Umfang die einzelnen Technologien zu dem 65-Prozent-Ziel beitragen sollen und mit welchen Ausbaupfaden dies erreicht werden kann. Die Ausbaupfade sind teilweise noch ambitionierter als im Klimaschutzprogramm 2030 geregelt, um zusätzliche Sicherheit bei der Erreichung des 65-Prozent-Ausbauziels zu schaffen. Hieraus abgeleitet werden die erforderlichen Ausschreibungsmengen für die einzelnen Technologien bis zum Jahr 2028 festgelegt, da diese Ausschreibungsmengen bis 2030 realisiert werden. Über die Ausschreibungsmengen für die Zeit ab 2029 (Realisierungszeitpunkt ab 2030) wird zu einem späteren Zeitpunkt entschieden.
3. **Weitere Dämpfung der Kostenentwicklung:** Durch die Umstellung der Fördersystematik auf Ausschreibungen ist es gelungen, die Förderkosten für Neuanlagen dauerhaft zu senken. Es ist für die Akzeptanz des EEG wichtig, die Kosten auch in Zukunft im Rahmen zu halten. Hierzu enthält dieses Gesetz diverse Einzelmaßnahmen. Diese Maßnahmen verfolgen das Ziel, die Förderkosten für neue Erneuerbare-Energien-Anlagen weiter zu senken. Das umfasst insbesondere eine Anpassung der Höchstwerte in den Ausschreibungen für Wind an Land und Photovoltaik, eine schnellere Reaktion des sog. „atmenden Deckels“ auf Kostenentwicklungen bei den Solaranlagen und eine Erhöhung des Wettbewerbs bei den Ausschreibungen für Solaranlagen durch die erwähnte Erweiterung der Flächenkulisse. Ein besonders wichtiger und wirksamer Schritt für die Stromverbraucher ist die teilweise Finanzierung der EEG-Umlage aus dem Bundeshaushalt. Im Klimaschutzprogramm wurde beschlossen, die Mehreinnahmen aus der ab 2021 für die Sektoren Wärme und Verkehr geltenden Kohlendioxid-Bepreisung nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz für die Entlastung der EEG-Umlage zu verwenden. Zusätzlich wurden im Rahmen der Beschlüsse zum Konjunkturpaket Zuschüsse zur EEG-Finanzierung in Höhe von 11 Milliarden Euro beschlossen, um die EEG-Umlage im Jahr 2021 auf 6,5 Cent/kWh und im Jahr 2022 auf 6,0 Cent/kWh zu deckeln. Damit wird die EEG-Umlage in den nächsten Jahren sinken. Die Absenkung der EEG-Umlage könnte mittelfristig zu konträren Effekten bei

der Besonderen Ausgleichsregelung führen. Bislang begünstigte Unternehmen könnten dann davon bedroht sein, die Schwellenwerte zur Besonderen Ausgleichsregelung nicht mehr zu erreichen und aus der Besonderen Ausgleichsregelung herauszufallen. Auch könnte die durch die COVID19-Pandemie verursachte Rezession dazu führen, dass Unternehmen die Schwellenwerte zur Besonderen Ausgleichsregelung nicht mehr erreichen. Um den daraus resultierenden Unsicherheiten Rechnung zu tragen und der Wirtschaft in der wirtschaftlich schwierigen Gesamtsituation keine weiteren Lasten aufzuerlegen, wird durch dieses Gesetz die Besondere Ausgleichsregelung weiterentwickelt, indem verhindert wird, dass Unternehmen aus der Besonderen Ausgleichsregelung herausfallen. Hierdurch wird Sicherheit für die Wirtschaft trotz der genannten Herausforderungen geschaffen.

4. **Erhalt der Akzeptanz für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien:** Es werden gezielte Maßnahmen zum Erhalt der Akzeptanz für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien vorgeschlagen. Windanlagenbetreiber können die Kommunen künftig – wie im Vermittlungsausschuss zwischen Bundestag und Bundesrat vereinbart – finanziell an den Erträgen neuer Anlagen beteiligen. Diese Zahlungen können für Anreize sorgen, damit vor Ort neue Flächen für die Windenergie ausgewiesen werden. Bei der Photovoltaik werden die Rahmenbedingungen für den sog. „Mieterstrom“ verbessert, wie bereits im Mieterstrombericht der Bundesregierung angekündigt. „Mieterstrom“ ist ein wichtiger Baustein für die Akzeptanz der Energiewende, weil er auch eine Partizipation von Mietern an der Energiewende ermöglicht.
5. **Stärkung der Netz- und Marktintegration:** Das BMWi hat ein Netzausbau-Controlling etabliert, wodurch der Netzausbau jetzt deutlich vorankommt. Erste Erfolge werden bereits sichtbar. Für eine verbesserte Netz- und Marktintegration enthält dieses Gesetz darüber hinaus ein Bündel an Einzelmaßnahmen. Für eine verbesserte regionale Steuerung und damit für eine erleichterte Integration in das Stromversorgungssystem und eine Reduzierung der Systemkosten werden „Südquoten“ in den Ausschreibungen eingeführt (Südquote für Windenergieanlagen an Land in Höhe von 15 Prozent in den Jahren 2021 bis 2023 und 20 Prozent ab dem Jahr 2024; Südquote für Biomasseanlagen in Höhe von 50 Prozent). Dies wirkt sich entlastend auf den Netzengpass in der Mitte Deutschlands aus und fördert flexible Stromerzeugung in Süddeutschland. Das bisherige Netzausbaugebiet wird dabei aufgehoben, da mit den „Südquoten“ neue Instrumente seine Aufgabe übernehmen. Für eine bessere Marktintegration werden die gleitende Marktpremie weiterentwickelt und die Vergütung von Erneuerbare-Energien-Anlagen bei negativen Börsenpreisen für Neuanlagen

abgeschafft. Durch diese Maßnahmen werden zugleich Anreize für Speichertechnologien und neue Perspektiven für Innovationen gesetzt. Die Bundesregierung wird die Regelung weiterentwickeln und für das parlamentarische Verfahren einen Vorschlag erarbeiten, der es ermöglicht, dass die Zeiten negativer Börsenpreise nach Ablauf des Förderzeitraums nachgeholt werden können.

6. **Einstieg in die „Post-Förderung-Ära“:** Der Ausbau der erneuerbaren Energien soll künftig so weit wie möglich marktgetrieben voranschreiten. Die Bundesregierung wird daher in ihren Erfahrungsberichten künftig regelmäßig untersuchen, ob und inwieweit die für die Erreichung der mittel- und langfristigen Ausbauziele erforderlichen Ausbaumengen auch marktgetrieben realisiert werden. In diesem Fall legt die Bundesregierung bis spätestens 2027 einen Vorschlag für einen Umstieg von der finanziellen Förderung auf einen marktgetriebenen Ausbau vor.⁴⁸

Die Anfallenden Kosten aus der EEG-Förderung werden von den Netzbetreibern über die EEG-Umlage an die Endverbraucher des Stroms weitergegeben. Die für die Wasserstoffwirtschaft bedeutendste Änderung in der EEG-Novelle 2021 ist gemäß § 69b der Wegfall dieser EEG-Umlage bei der nachweislichen Nutzung grünen Stroms zur Erzeugung von grünem Wasserstoff. Welche Kriterien hierfür zu erfüllen sind, wurde in der „Verordnung zur Umsetzung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021 und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften“ vom 19.05.2021 geregelt. Darin ist gemäß § 12i geregelt, dass die Befreiung von der EEG-Umlage nach EEG 2021 §69b für die ersten 5000 Vollbenutzungsstunden einer Anlage zur Erzeugung grünen Wasserstoffs möglich ist, wenn der Strom verwendet wurde,

- der nachweislich aus Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien im Sinn des § 3 Nummer 21 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes stammt,
- der nachweislich zu einem Anteil von mindestens 85 Prozent aus Anlagen stammt, die ihren Standort in der Preiszone für Deutschland haben, und der nachweislich zu einem Anteil von höchstens 15 Prozent aus Anlagen stammt, die ihren Standort in einer Preiszone haben, die mit der Preiszone für Deutschland elektrisch verbunden ist, und
- für den weder eine Zahlung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz, nach dieser Verordnung oder nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz in der jeweils für die Anlage maßgeblichen Fassung noch eine sonstige Förderung im Sinn des § 9 Nummer 6 Buchstabe b in Anspruch genommen wird.

⁴⁸ (68)

(2) Strom, der in einer Einrichtung zur Herstellung von Grünem Wasserstoff verbraucht wird, stammt nachweislich aus Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien im Sinn des § 3 Nummer 21 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, wenn,

1. im Fall des Verbrauchs von Strom, den ein Elektrizitätsversorgungsunternehmen über ein Netz an den Betreiber der Einrichtung geliefert hat,
 - a. für diesen Strom Herkunftsnachweise für erneuerbare Energien nach § 30 der Herkunfts- und Regionalnachweis-Durchführungsverordnung entwertet wurden und
 - b. diese Herkunftsnachweise, sofern die Anlage ihren Standort im Bundesgebiet hat, die Angabe zur optionalen Kopplung nach § 16 Absatz 3 der Herkunfts- und Regionalnachweis-Durchführungsverordnung enthalten, oder
2. im Fall des Verbrauchs von Strom, der nicht durch ein Netz durchgeleitet wird, der Strom in einer Anlage zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien im Sinn des § 3 Nummer 21 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes erzeugt und zeitgleich bezogen auf jedes 15-Minuten-Intervall in der Einrichtung zur Herstellung von Grünem Wasserstoff verbraucht wurde.

Eine mess- und eichrechtskonforme Messung der Zeitgleichheit von Erzeugung und Verbrauch ist zur Erfüllung der Anforderung nach Satz 1 Nummer 2 nur erforderlich, wenn nicht schon anderweitig sichergestellt ist, dass Strom, bezogen auf jedes 15-Minuten-Intervall, höchstens bis zur Höhe der tatsächlichen Erzeugung als Verbrauch der Einrichtung zur Herstellung von Grünem Wasserstoff als erzeugt und verbraucht in Ansatz gebracht wird.

(3) Im Sinn dieses Paragraphen ist die Anzahl der Vollbenutzungsstunden der Quotient aus dem gesamten kalenderjährlichen Stromverbrauch und dem maximalen Stromverbrauch der Einrichtung zur Herstellung von Grünem Wasserstoff im Auslegungszustand während einer Betriebsstunde unter normalen Einsatzbedingungen.⁴⁹

⁴⁹ (69); (70)

3.3 Geeignete Gebiete für die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur

Mit dem Projekt H2BrakeCO2 soll eine Wasserstoffinfrastruktur entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Erzeugung über die Speicherung und dem Transport bis hin zur Bereitstellung und Verwendung dieses Energieträgers, konzeptioniert werden.

Für jedes dieser vier Handlungsfelder wird Raum benötigt auf dem die Infrastruktur für den Wasserstoffkreislauf geschaffen werden kann. Des Weiteren setzt jedes Handlungsfeld spezifische Anforderungen an die zu untersuchenden Gebiete voraus, mit denen die Eignung für die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur bewertet werden kann. Um eine Grundlage für diese spätere Bewertung zu schaffen, sollen im folgenden Schritt die Gewerbegebiete in näherer Umgebung der Stadt Brake betrachtet werden.

Abbildung 17 zeigt einen Übersichtsplan mit den zur Verfügung stehenden Gewerbegebieten des Landkreises Wesermarsch. Bereits eingezeichnet ist der geplante Verlauf der Autobahn 20, welche künftig die A27 und die A29 verbinden soll und eine Chance für die Wesermarsch und das Projekt H2BrakeCO2 zur überregionalen Vernetzung des Untersuchungsgebiets darstellt. Sämtliche die Gewerbegebiete betreffenden Informationen und Abbildungen, in diesem Abschnitt sind der Gewerbeflächenbroschüre der Wirtschaftsförderung Wesermarsch GmbH mit dem Stand April 2021 entnommen.⁵⁰

Zu der im Übersichtsplan eingezeichneten Gewerbefläche an den Position 5 stehen keine Informationen zur Verfügung.

⁵⁰ (17)



Abbildung 17: Übersichtsplan der Gewerbegebiete in der Wesermarsch

Gewerbegebiet Boitwarder Groden Nördlich Gleisbogen (Position 7)

Dieses Gewerbegebiet im Boitwarder Groden nördlich des Gleisbogens liegt in unmittelbarer Nähe zum Seehafen Brake. Es verfügt über einen Straßenanschluss sowie einen Anschluss an die Hafenbahn und kann als Gesamtfläche oder in Parzellen aufgeteilt zur Verfügung gestellt werden. Vorgesehen ist die Ansiedlung hafenaffiner Industrie, Gewerbe oder Dienstleistungen.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	32,00 ha
Verfügbare Nettofläche	32,00 ha
Pachtmöglichkeiten	Erbbaurechtsvertrag oder Mietvertrag
Eigentümer	Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG
Status Bebauungsplan	in Vorbereitung

Gewerbegebiet Boitwarder Groden Südlich Gleisbogen (Position 9)

Dieses Gewerbegebiet im Boitwarder Groden südlich des Gleisbogens verfügt über einen Straßen- und Gleisanschluss (DB-Netz) sowie Zugang zu Nordpier und Niedersachsenkai, weitere Erschließung erfolgt bedarfsgerecht, die Gesamtfläche ist parzellierbar. Die zulässige Höhe baulicher Anlagen beträgt 60 m. Auch hier ist die Ansiedlung hafenaaffiner Industrie, Gewerbe oder Dienstleistungen vorgesehen.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	23,00 ha
Verfügbare Nettofläche	23,00 ha
Pachtmöglichkeiten	Erbbaurechtsvertrag oder Mietvertrag
Eigentümer	Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiete Gemarkung Golzwarden

Diese unbebauten Flächen in Golzwarden verfügen über Straßenanschlüsse, sind hochwassersicher und erlauben eine Schwergutverladung bis 1.000 Tonnen. Vorgesehen ist die Ansiedlung hafenaffiner Industrie, Gewerbe oder Dienstleistungen.

nördlicher Teil (Position 6):

Gesamtgröße (Brutto): 13,00 ha

Verfügbare Nettofläche: 13,00 ha



Niedersachsenkai – westlicher Teil (Position 8):

Gesamtgröße (Brutto): 6,70 ha

Verfügbare Nettofläche: 6,70 ha



Sonstige Daten

Pachtmöglichkeiten	Erbbaurechtsvertrag oder Mietvertrag
Eigentümer	Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor
Nutzungsart	Sondergebiet (SO) Hafen) lt. B-Plan

Gewerbegebiet Heinestraße (Position 12)

Auch das Gewerbegebiet Heinestraße zeichnet sich durch die geringe Distanz von 2 km zum Seehafen Brake aus. Das Gewerbegebiet grenzt unmittelbar an die B212 und die B211.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	0,37 ha
Verfügbare Nettofläche	0,37 ha
Preis exkl. Erschließung	nach Richtwert
Eigentümer	Sonstige(r) Eigentümer
Status Bebauungsplan	kein Bebauungsplan vorhanden

Gewerbegebiet Brake-West (Position 11)

Das Gewerbegebiet liegt im Schnittpunkt der B 211 – neu und der B 212 westlich der Kernstadt Brake (Unterweser). Aktuell unbebaute und unerschlossene Flächen. Die Erschließung erfolgt bedarfsgerecht. Ansiedlungen u.a. vorstellbar im großflächigen Einzelhandel, Logistik oder Produktion.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	24,00 ha
Verfügbare Nettofläche	20,00 ha
Preis exkl. Erschließung	Auf Anfrage
Eigentümer	Sonstige(r) Eigentümer
Status Bebauungsplan	kein Bebauungsplan vorhanden

Gewerbegebiet Erweiterung Max-Planck-Straße (Position 10)

Das Gewerbegebiet liegt unmittelbar an der B 212 nördlich der Kernstadt Brake (Unterweser) und stellt eine Erweiterung des vorhandenen Gewerbegebietes. Aktuell unbebaute und unerschlossene Flächen. Die Erschließung soll in den Jahren 2021/2022 erfolgen.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	17,00 ha
Verfügbare Nettofläche	15,00 ha
Preis exkl. Erschließung	Auf Anfrage
Eigentümer	Kommune, Sonstige(r) Eigentümer
Status Bebauungsplan	Für 2021 geplant

Gewerbegebiet Kasernenstraße (Position 16)

Das Gewerbegebiet Kasernenstraße in Elsflëth liegt in unmittelbarer Nähe zur B212. Die 211 ist 11 km entfernt, zum Seehafen Brake sind es 12 km. Bereits vorhandene Branchen sind ein Verkehrs- und Reiseunternehmen sowie eine Bäckerei.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	3,26 ha
Verfügbare Nettofläche	1,66 ha
Preis	auf Anfrage
Eigentümer	Sonstige(r) Eigentümer
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor
Kommentar zur Nutzung	60/45 dB(A)/m ²

Gewerbegebiet Oberrege-West (Position 17)

Das Gewerbegebiet Oberrege-West in Elsflëth liegt in unmittelbarer Nähe zur B212. Die 211 verläuft 11 km entfernt, zum Seehafen Brake sind es 12 km. Bereits Vorhandene Branchen sind KFZ-Werkstatt, Autohandel, Heizung-Sanitär-Lüftung, Zimmerei, Tischlerei, EU-Schlachthof, Dachdecker, Schlosserei und Landtechnik.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	40,00 ha
Verfügbare Nettofläche	25,90 ha
Preis	13,00 €/qm
Eigentümer	Private(r) Eigentümer
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiet am Wesertunnel (Position 3)

Das Gewerbegebiet am Wesertunnel befindet sich direkt am südlichen Eingang in das Stadtgebiet Nordenham am Knotenpunkt von B 212 / B 437 (Wesertunnel).

Die A27 (Cuxhaven - Bremen) ist direkt durch den Wesertunnel in 9,0 km Entfernung erreichbar. Das Areal befindet sich unmittelbar an der Trasse der geplanten Küstenautobahn A20. Dieses Areal wird künftig in das hier entstehende interkommunale Gewerbegebiet eingegliedert.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	21,06 ha
Verfügbare Nettofläche	6,16 ha
Preis inkl. Erschließung	11 € / m ² zuzüglich Kanalanschlussbeitrag
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiet Gildestraße, Großenmeer (Position 15)

Das Gewerbegebiet Gildestraße Großenmeer liegt in unmittelbarer Nähe zum Oberzentrum Oldenburg bzw. zum Autobahnkreuz Oldenburg-Nord. Der Seehafen Brake ist 17 km entfernt. Zur A 29 sind es 7 km.

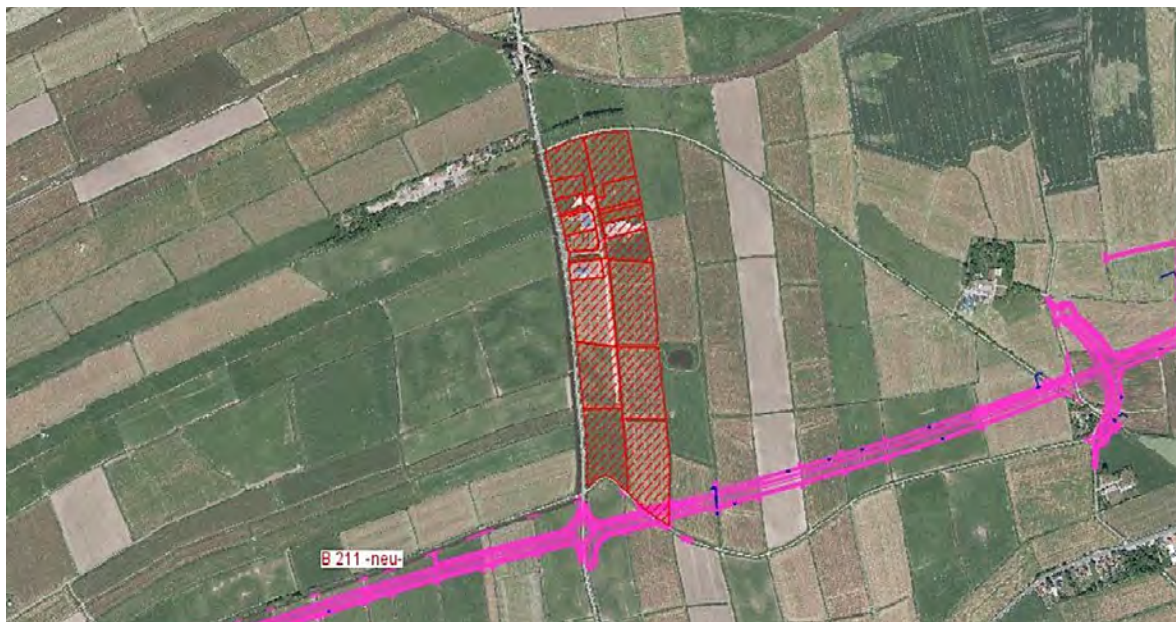


Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	4,37 ha
Verfügbare Nettofläche	4,37 ha
Preis	noch keine Angaben möglich
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	z.Z. in der Entwurfsphase

Gewerbegebiet Wesermarsch-Mitte (Position 14)

Das Gewerbegebiet Wesermarsch-Mitte liegt direkt am Verlauf der B211-Erweiterung und damit kurz vor der Einfahrt zum Stadtgebiet Brake in einem Kilometer Entfernung zur B212. Der Seehafen Brake ist 6 km entfernt. Bereits vorhandene Branchen sind ein Metall- und Glasbaubetrieb, ein Anlagenbaubetrieb und ein Zimmereibetrieb.

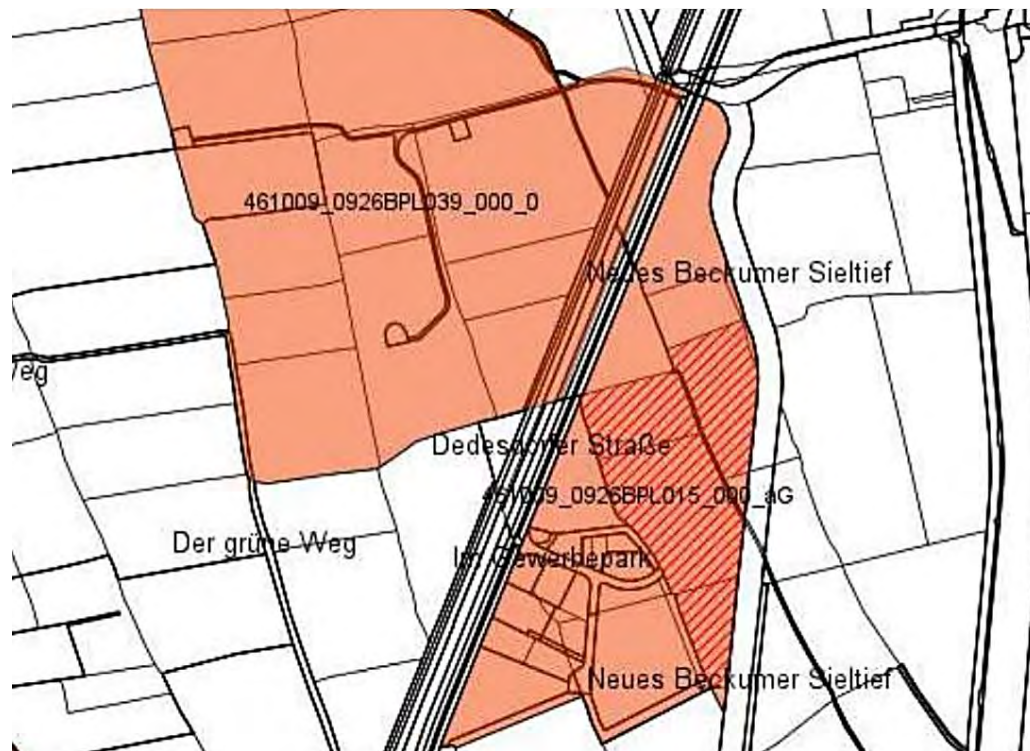


Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	18,30 ha
Verfügbare Nettofläche	4,67 ha
Preis inkl. Erschließung	12,78 EUR/qm
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Im Gewerbepark (Position 4)

Das Gewerbegebiet im Gewerbepark der Gemeinde Stadland weist 5,5 ha Fläche auf, die überplant aber noch nicht erschlossen sind. Die B212 verläuft in 3 km Entfernung, der Seehafen Brake ist 11 km entfernt. Bereits vorhandene Branchen sind ein Recyclinghof mit Kompostierungsanlage, ein Gerüstbaubetrieb, ein Reitschneider, ein Sachverständiger für Fahrzeugtechnik, eine Keramikformherstellung und Handel, ein Reisebusunternehmen und ein Abwasserbeseitigungsbetrieb.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	15,00 ha
Verfügbare Nettofläche	5,50 ha
Preis inkl. Erschließung	16,69 EUR/qm
Eigentümer	Privater(r) Eigentümer
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiet Jaderberg, An der Bahn (Position 13)

Das Gewerbegebiet Jaderberg ist über die A 29 und der Abfahrt Jaderberg ohne Umwege erreichbar und verfügt über eine schwerlastfähige Straßenanbindung. Die B437 verläuft in 8,5 km Entfernung. Die übliche Versorgung mit Wasser, Gas, Strom und Breitband ist vorhanden.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	9,20 ha
Verfügbare Nettofläche	2,30 ha
Preis inkl. Erschließung	20,00 €/qm
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Industriepark Blexen (Position 1)

Die Flächenareale im nördlichen Stadtteil Blexen sind an die dort vorhandenen Anlagen der Hafenlogistik angeschlossen. Die Ansiedlungsfläche ist maßgeblich für Produktionsbetriebe aus der maritimen Wirtschaft und der Offshore-Branche vorgesehen.

Der Seehafen Brake ist über die B212 erreichbar und befindet sich in 32 km Entfernung.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	43,70 ha
Verfügbare Nettofläche	32,00 ha
Preis inkl. Erschließung	auf Anfrage
Eigentümer	Private(r) Eigentümer, Kommune
Status Bebauungsplan	öffentliche Auslegung

Gewerbepark Nord (Position 2)

Das Gewerbegebiet grenzt an die Seehafenanlage mit RoRoAnleger des Hafenbetriebes Rhenus Midgard GmbH & Co. KG. Vorhandene Branchen sind Hafendienstleistungen, Holzbearbeitung, Elektrotechnik, Stahlbau, Heizungsbau und Baustoffrecycling.

Das Gewerbegebiet liegt direkt an der B212 und ist über die südlich gelegene B437 mit dem Wesertunnel und der A27 verbunden. Der Seehafen Brake ist 30 km entfernt.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	71,11 ha
Verfügbare Nettofläche	15,94 ha
Preis	15,00 € / m ² zzgl. Kanalanschlussbeitrag
Eigentümer	Private(r) Eigentümer, Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiet Ranzenbüttel (Position 18)

Das Erweiterungsgebiet „Ranzenbüttel“ befindet sich in der Entwicklung. Die Teilbereiche 2 (11,7 ha) und 3 (3,4 ha) werden von der Gemeinde Berne ab ca. 2021 angeboten.

Es befindet sich in einem Kilometer Entfernung zur B212 und der B74, Die Versorgung mit Wasser, Gas, Strom, Breitband, Glasfaser sowie eine zentrale Schmutzwasserentsorgung wird gewährleistet. Der Seehafen Brake ist 21 km entfernt und über die B212 erreichbar.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	23,10 ha
Verfügbare Nettofläche	15,10 ha
Preis	auf Anfrage
Eigentümer	Kommune

Gewerbegebiet Edenbüttel I und II (Position 19)

Zurzeit stehen keine Gewerbegrundstücke im Gewerbegebiet Edenbüttel mehr zur Verfügung. Die Erweiterung des Gewerbegebietes Edenbüttel II ist in der Erschließungsplanung.

Die Distanz zum Seehafen Brake beträgt 33 km, welche über die in 3 km Entfernung verlaufende B212 zurückzulegen ist.

Eine Fährverbindung nach Bremen Nord liegt in unmittelbarer Nähe.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	23,00 ha
Verfügbare Nettofläche	8,30 ha
Preis inkl. Erschließung	auf Anfrage
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiet Deichshausen (Aero Mare, westlicher Teil) (Position 20)

Bei dem Gewerbegebiet Deichshausen handelt es sich um Gewerbeflächen an seeschifftiefem Gewässer (Weser) mit Anbindung an den gezeitenabhängigen Hafen Ochtmum (IMO Port facility number: DELEW 0008), der geeignet ist für den Umschlag von Großbauteilen (z. B. Anlagenkomponenten der Windenergie usw.).

Die Distanz zum Seehafen Brake beträgt hier 35 km über die 5 km entfernte B212.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	9,80 ha
Verfügbare Nettofläche	6,10 ha
Preis inkl. Erschließung	23,00 €/m ²
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

Gewerbegebiet Altenesch (Position 21)

Für das Gewerbegebiet Altenesch ist der Verkauf von Flächen erst ab einer Größe von 2.500 m² vorgesehen.

Auch hier beträgt die Distanz zum Seehafen Brake 35 km über die 5 km entfernte B212.



Sonstige Daten

Gesamtgröße (Brutto)	17,95 ha
Verfügbare Nettofläche	0,00 ha
Preis inkl. Erschließung	13,00 €/m ²
Eigentümer	Kommune
Status Bebauungsplan	liegt rechtskräftig vor

3.3 Stromnetzausbau in der Wesermarsch

Zu der Identifikation und Bewertung geeigneter Gewerbeflächen für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur ist neben der Lage, der verfügbaren Nettofläche, der Anbindung an das Verkehrsnetz und dem Preis einer Gewerbefläche, zudem die Anbindung an das Stromnetz und dessen Ausbau von großer Bedeutung.

Abbildung 18 zeigt eine Karte, in der das Übertragungsnetz und Teile des Verteilernetzes der Wesermarsch eingezeichnet sind und gibt damit einen groben Überblick des Stromnetzausbaus des Untersuchungsgebiets. Geprägt ist das Stromnetz in der Wesermarsch von dem ehemaligen Kernkraftwerk Unterweser in Esenshamm, welches sich derzeit im Rückbau befindet und dem Druckluftspeicherkraftwerk in Huntorf, welches zu Betriebszeiten des Kernkraftwerks als Stromspeicher fungierte. Diese beiden Standorte zeichnen sich durch die Verfügbarkeit starker Stromanschlüsse im hohen Voltbereich aus, so dass in der Wesermarsch auch Elektrolyseanlagen mit Anschlussleistungen von 200 MW realisierbar sind und somit die Versorgung des gesamten Untersuchungsgebiets mit Wasserstoff sichergestellt wäre.

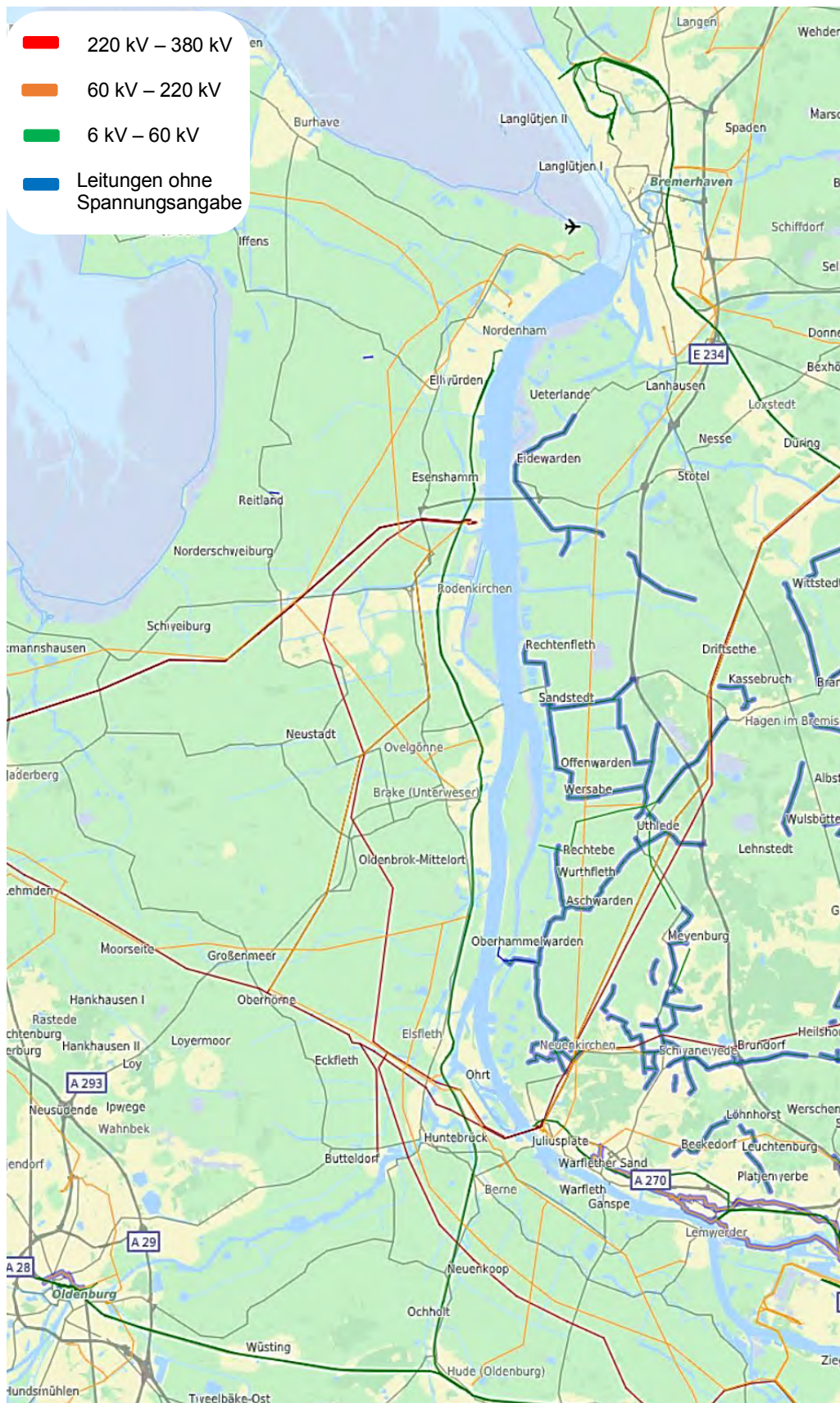


Abbildung 18: Stromnetzausbau in der Wesermarsch⁵¹

⁵¹ (18) [modifiziert]

3.4 Abgleich mit anderen Wasserstoffinitiativen in der Region

Die Rolle des Energieträgers Wasserstoff als Vehikel der Sektorenkopplung und der grünen Energiewende spiegelt sich in der Vielzahl an Projekten und Initiativen wider, die in der näheren Vergangenheit initiiert wurden und auch weiterhin geführt werden. Allein in dem laufenden HyLand-Förderprogramm des BMVI werden auf Bundesebene 25 Regionen in drei Kategorien gefördert, zu denen die Stadt Brake mit dem Projekt H2BrakeCO2 in der Kategorie HyExperts gehört.⁵² (Stand 12/2020)

Da sich die praktische Anwendung der bereits marktreifen Wasserstofftechnologien nur schleppend voran bewegt, Wasserstoffprojekten vielfach ein Inseldasein attestiert wird und insbesondere in der Anfangsphase innovativer Vorhaben viele Schwierigkeiten aufkommen, spielt die Vernetzung und der Austausch mit parallellaufenden Projekten in der Anlaufphase eine fundamentale Rolle, auch zur Schaffung von Synergien.

In der Wesermarsch wird ein signifikanter Beitrag zum gegenseitigen Austausch parallellaufender nachhaltiger Energiewendeprojekte durch das „Strategiekonzept zur Neuausrichtung der zukünftigen grünen Energiewirtschaft im Landkreis Wesermarsch“⁵³ der Wirtschaftsförderung Wesermarsch GmbH (im Folgenden „Strategiekonzept Wesermarsch“) geleistet. Das „Strategiekonzept Wesermarsch“ richtet sich mit Handlungsempfehlungen an 88 laufende und abgeschlossene nachhaltige Energiewendeprojekte in der Wesermarsch und dem Umland und trägt damit zur Schaffung von Synergien bei.

Mit dem folgenden Abschnitt soll ein Eindruck über das Voranschreiten und die Entwicklung der regionalen Energiewende anhand angestrebter Wasserstoffvorhaben entstehen, um die Erfolgsaussichten einer regionalen Wasserstoffwirtschaft hervorzuheben an die das Projekt H2BrakeCO2 anknüpfen kann. Hierzu lässt sich Abbildung 19 heranziehen, die einen Überblick über bestehende Wasserstoffvorhaben (Stand 12/2020) in den fünf norddeutschen Bundesländern Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein verschafft.

⁵² (19)

⁵³ (23)



Abbildung 19: Wasserstoffinitiativen in den fünf norddeutschen Bundesländern⁵⁴

An dieser Stelle sollen *die* Wasserstoffvorhaben aus Abbildung 19 hervorgehoben werden, die hinsichtlich ihrer Schwerpunkte mit einem Fokus auf Hafen und/oder Straßengüterlogistik parallelen zu H2BrakeCO2 aufweisen und damit ein hohes Potential zum Bilden von Synergien bieten. Ergänzt werden die in Abbildung 19 dargestellten Projekte durch weitere nennenswerte Wasserstoffprojekte, die sich durch eine Fokussierung auf die Straßengüterlogistik auszeichnen.

Synergieeffekte, die sich durch eine Zusammenarbeit mit ähnlichen Wasserstoffprojekten einstellen können:

- Senkung der Anschaffungskosten von Fahrzeugen
- Aufbau Versorgungskapazitäten für grünen Wasserstoff
- Senkung der Herstellungskosten von dem Wasserstoff, da ein gleichbleibend hoher Bedarf an Wasserstoff höhere Produktionsmengen nach sich zieht und leistungstärkere Elektrolyseanlagen rechtfertigt.

⁵⁴ (20)

- Aufbau notwendiger Infrastruktur (Elektrolyse, Tankstellen etc.)
- Bündelung der Kompetenzen und hochwertiger Wissensaustausch die zur Vermeidung von Doppelarbeiten führen
- Durch ein überregionales Wasserstoff-, Tankstellennetz kann dies ein Anreiz für weitere Unternehmen sein, ihre Fahrzeugflotte und deren Produktionsprozess auf Wasserstoffbasis umzustellen und so einen wertvollen Beitrag zur weiteren CO₂-Reduzierung zu leisten.

Tabelle 15: Wasserstoffvorhaben mit dem Fokus auf Häfen und/oder Straßengüterlogistik⁵⁵

Position/ Ort	Name	Projekthinhalt
ND1	Hyways for Future	Ziel von Hyways for Future ist es, in der Wasserstoffmodellregion Metropolregion Nordwest langfristig klimafreundlichen Wasserstoff insbesondere im Bereich Verkehr zu etablieren (u.a. mit Wasserstofftankstellen, wasserstoff-betriebenen Bussen, Reinigungsfahrzeugen und LKW)
HB3	SHARC II	Koordination der Umsetzung von Investitionsmaßnahmen zur besseren Integration erneuerbarer Energie in ein „Smart Grid“ im Überseehafen Bremerhaven. Wasserstoff kann dazu beitragen, das Ziel eines CO ₂ -neutralen Hafens zu erreichen. So können Überschussmengen erneuerbarer Energie zur Herstellung von Wasserstoff genutzt werden, der wiederum bspw. in Rangierlokomotiven oder bei hafeninternen Verkehren zum Einsatz kommt.
	Clean Hydrogen Coastlines	Clean Hydrogen Coastlines (IPCEI/EU): Geplant ist der Aufbau von 200 MW (Ausbaustufe 400 MW) Elektrolyseleistung für die Stahlerzeugung und den Verkehrsbereich. Konkret der Ausbau des Kavernenspeichers Huntorf zur Versorgung von Bremen, Oldenburg und Hamburg, die Schaffung der Voraussetzungen zur Produktion von 12.000 H ₂ -Nutzfahrzeugen bis 2027 (andere Quelle 2026) sowie der weitere Ausbau der Wasserstofftankstellen mit Kapazität zur Betankung von 8.000 Lkw, Bussen, Zügen und weiteren Schwerlastfahrzeugen.
HB	ITZ Nord	ITZ Nord Innovations- und Technologiezentrum Wasserstofftechnologie⁷ (IPCEI): Gemeinsames ITZ an den Standorten Bremen/Bremerhaven, Stade und Hamburg für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in Schiff- und Luftfahrt. Unterstützung von Start Up's und KMU bei der Umsetzung Ihrer Wasserstoffvorhaben.
HB	Testregion Mobilität	Testregion für mobile Wasserstoffanwendungen Bremerhaven (Bremen-Fonds): Anschaffung und

⁵⁵ Eigene Darstellung nach (20), (21), (22)

		Betrieb eines Plasmalyseurs für die Gewinnung von Wasserstoff (H ₂) aus Abwasser und nachhaltiger Energie als Treibstoff für schwere Nutzfahrzeuge. Studie zur Einbindung eines 3D-Teststandes in die Gesamt-Testinfrastruktur zur Erprobung von Wasserstoffkomponenten und Komplettsystemen im 3-dimensionalen Raum. Untersuchung der Realisierbarkeit eines Testzentrums für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, Flurförderzeuge und Arbeitsgeräte in Bremerhaven u.w.
HH5	E4Ships	Demonstrationsprojekte von thyssenkrupp Marine Systems und Meyer Werft. Brennstoffzellensysteme sollen die Aggregate zur Versorgung der Nebenverbraucher mit Strom und Wärme bzw. Kälte substituieren. Als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sind sie besonders effizient. Der Antrieb durch Methanol bzw. Diesel reduziert die Emissionen von Ruß, Schwefel, Stickstoff und CO ₂ .
HB	H2Cool	H2Cool prelude (Efre, AUF): Konzeption eines H ₂ -Kühl-Lkw mit Nachfolgeprojekt zur prototypischen Umsetzung.
HH13	Umrüstung von Fahrzeugen im Schwerlastverkehr (40t) auf H ₂ -Antrieb	Es werden derzeit die ersten Prototypen hergestellt (Umrüstung konventioneller Fahrzeuge auf H ₂ -Antrieb, Tanks, etc.), nächste Ausbaustufe (bis zu 35 Fahrzeuge) ist in Vorbereitung
HB	H2BPMM	Wasserstofftechnologie Business Process Management Modeling - H2BPMM (Metropolregion Nordwest): Forschungsprojekt zur Standardisierung und Digitalisierung von Genehmigungsverfahren zur Beschleunigung der Errichtung von H ₂ -Tankstellen.
HB/HH	SH2unter	Konzeption einer H ₂ -Rangierlok für den Hafenbetrieb gemeinsam mit Alstom.
NI8	Wasserstoffnetzwerk-Nordostniedersachsen (H ₂ -NoN)	Das Netzwerk positioniert den Amtsbezirk Lüneburg (Landkreise Celle, Cuxhaven, Harburg, Heidekreis, Lüneburg, Lüchow-Dannenberg, Osterholz, Rotenburg (Wümme), Stade, Uelzen und Verden) als Wasserstoff-Modellregion. Neben der Herstellung und Speicherung von Wasserstoff ist die Umsetzung eines regionalen Konzeptes zur integrierten Wasserstoffnutzung im Bereich Lastverkehr vorgesehen.
HB/NI	Wasserstoffregion Nordwest	die Wasserstoffstrategie für die Metropolregion Nordwest ist ein wesentlicher Baustein, mit der das große Potenzial der vielfältigen regionalen Kompetenzen und der besonderen Eignung als Wasserstoffregion sichtbar gemacht und so zur weiteren Entfaltung beitragen soll.
NI9	WASh2 Emden	„WASh2Emden“ analysiert die Möglichkeit einer Umstellung des Hafens auf eine Versorgung aus erneuerbaren Energien auf Basis von Wasserstoff. Ziel ist eine langfristige Reduktion von Emissionen im Hafenbetrieb durch den Einsatz von Wasserstoff in der Logistik sowie bei den im Hafen liegenden Schiffen.

SH13	H2-basierte Logistik	Die Projektträger entwickeln und realisieren mit Unternehmen aus Logistik, Handel, kommunaler Abfallwirtschaft und der Bauwirtschaft die wirtschaftliche Nutzung von grünem Wasserstoff im Güterverkehr. In Neumünster haben sich Unternehmen mit entsprechenden Fahrzeugflotten, Fahrzeuganbieter und Wasserstoffproduzenten als Unternehmensinitiative zusammengefunden. Ziel ist es das Gesamtsystems von der Produktion über Logistik, Tankstelle bis zur Abnahme von grünem Wasserstoff unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufzubauen.
Fulda	HyWheels	Erstellung eines Feinkonzepts zur Anschaffung von mindestens 1.000 Brennstoffzellen-LKWs in der Region Osthessen.
NI	Energiewendedrehkreuz Wesermarsch (geplant)	Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoffinfrastruktur inkl. H2-Nutzungszenarien (z.B. in Hafen und Logistikbereich)

Zur Veranschaulichung der Synergieeffekte, werden stellvertretend für weitere Wasserstoffprojekte die Projekte „Hyways for Future“, „Clean Hydrogen Coastline“ und das „Energiewendedrehkreuz Wesermarsch“ detaillierter herangezogen. Folgende Schwerpunkte liegen bei den Einzelnen Projekten vor:

Hyways for Future

Ziel:

- Aufbau von Elektrolyse-Kapazitäten und Wasserstofftankstellen
- Investitionen in Flotten von Bussen, Müllfahrzeugen, LKW und PKW
- Der grüne Wasserstoff wird zu Tankstellen geliefert und etwa für den Personennahverkehr, die Müllabfuhr oder für LKW eingesetzt

Basis/Grundlage/Motivation:

- Der Nordwesten bietet die besten Voraussetzungen eine Vorreiterregion für Wasserstoff im Verkehrssektor zu sein. Durch die Vielzahl von Windenergieanlagen an Land und auf See wird der hier verbrauchte Strom bereits heute fast 100% erneuerbar erzeugt. Daneben befinden sich in der Region auch Kavernen zur Speicherung des Wasserstoffs und eine Vielzahl an potenziellen Abnehmern.
- Die EWE verfügt als Konsortialführer des Projekts über das Know How, die Infrastruktur und die Transportnetze, um den aus erneuerbaren Energien gewonnen Strom für die Produktion von grünem Wasserstoff im Elektrolyse-Verfahren zu erzeugen, zu transportieren und zu nutzen.

Investitionen:

EWE und Partner:	insgesamt ca. 90 Millionen Euro
Fördersumme:	bis zu 20 Millionen Euro (in Form von Investitionszuschüssen für die Anschaffung von Wasserstoff- und Brennstofftechnologie über das HyLand Programm)

Umsetzung:

Hyways for Future soll durch ein starkes Partnernetzwerk den Nordwesten zur Wasserstoff-Vorreiterregion machen. Es sollen Konzepte und Projekte zur regionalen Wertschöpfung erarbeitet, neue Förderprojekte angestoßen und Infrastruktur und Absatzmärkte entwickelt werden. Durch das Innovationscluster wird das Thema Wasserstoff in den Alltag der Nordwest-Region gebracht. Zur Ausarbeitung und Umsetzung des Projektes wurden bei Hyways for Future vier Arbeitsgruppen mit regionalen Unternehmen und unterschiedlichen Aufgabenbereichen gebildet:

Kommunale Fahrzeuge und ÖPNV *(Leitung: Verkehrsregion-Nahverkehr Ems-Jade (VEJ), Ingenieurbüro PLANET GbR, Stadt Oldenburg)*

Themenschwerpunkt: Nutzung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge in Kommunen und im ÖPNV, aktuell vor allem Müllsammelfahrzeuge und Busse.

Durch den Erfahrungsaustausch, innerhalb der Region aber auch überregional, sollen die Möglichkeiten für den Einsatz von Wasserstofffahrzeugen aufgezeigt und präzisiert werden. Potenzialabschätzungen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und das gemeinsame Lernen von- und miteinander sollen den Markthochlauf in der Nordwest-Region unterstützen. Die Fuhrparkplanung spielt hier eine besondere Rolle.

Gütertransport und Logistik *(Leitung: Oldenburgischen Industrie- und Handelskammer (IHK), Hochschule Bremerhaven (Prof. Dr.-Ing. Wagner vom Berg))*

Themenschwerpunkt: Identifizierung Einsatz- und Absatzpotenziale wasserstoffbetriebener Fahrzeuge in der Güterverkehr- und Logistikbranche.

Welche Fahrzeuge werden hier benötigt? Wo sind die Hürden für die Unternehmen Wasserstofffahrzeuge in ihrem Betrieb zu testen? Wie sieht aktuell die Wirtschaftlichkeit aus? Durch den (über-) regionalen Austausch sollen diese Fragen innerhalb der AG beantwortet werden. Ziel ist es, neue Förderprojekte anzustoßen sowie im besten Fall konkrete Konzepte und Projekte zur regionalen Wertschöpfung zu entwickeln.

Maritime Anwendungen und Hafenlogistik (Leitung: MARIKO, DLR Institut für Maritime Energiesysteme)

Themenschwerpunkt: Nutzung von Wasserstoff im maritimen Sektor.

Fokussierung auf die drei Themencluster Wasserstoff in der Schifffahrt, H2-Import und Hafenlogistik. Aktuelle und zukünftige Möglichkeiten sollen dargestellt und diskutiert werden. Hierbei werden auch die Herausforderungen definiert und Handlungsansätze sowie eventuell neue Projektideen erarbeitet.

Infrastruktur und Wasserstoffbereitstellung (Leitung: EWE NETZ, swb)

Themenschwerpunkt: Bezugsquellen von Wasserstoff, Bereitstellung, Lagerung, und dem Transport, Standortwahl für Tankstellen.

Identifizierung optimaler Standortkriterien für Wasserstofftankstellen. Die Möglichkeiten der H2-Erzeugung und die Speicherung spielen hierbei eine gewichtige Rolle. Ziel ist es, die Lieferanten der benötigten Mengen - und auch den Bedarf an (grünem) Wasserstoff zu identifizieren, verschiedene Varianten des H2-Transports zu bewerten und idealerweise Erkenntnisse für den nachhaltigen Infrastrukturaufbau und die Planung abzuleiten.

Öffentlichkeitsarbeit und Marketing (Leitung: EWE, Metropolregion Nordwest)

Themenschwerpunkt: Öffentliche Kommunikation über das HyWays for Future Projekt und Berichterstattung über die Wasserstoffregion im Nordwesten.

Verschiedene Aktionen und Kanäle werden mobilisiert, um die Öffentlichkeit mit dem Thema Wasserstoff vertraut zu machen.⁵⁶

Synergieeffekte zu H2BrakeCO2:

Für die Umsetzung des Projektes H2BrakeCO2 werden sowohl Elektrolysekapazitäten als auch auf Wasserstoffbasis umgestellte Nutzfahrzeuge benötigt. Um die Nutzung und Betankung der Wasserstoff-Fahrzeuge sicherzustellen, ist eine H2-Tankinfrastruktur in der Region zwingend erforderlich. Um ebenfalls den LKW-Bestand für Langstrecken umzurüsten und einsatzfähig zu machen, ist ein weitreichendes, überregionales Tankstellennetz von zentraler Bedeutung. Die Zusammenarbeit zwischen den Projekten Hyways for Future und H2BrakeCO2 und der damit verbundene Austausch von Informationen bewirkte unter Anderem, dass die Stadt Brake in diesem Tankstellennetz nun doch berücksichtigt wird und eine Wasserstofftankstelle im Hafen der Stadt Brake budgetiert ist.

⁵⁶ (71)

Clean Hydrogen Coastline

- Auf-, Ausbau von bis zu 400 Megawatt Elektrolysekapazitäten
- Speicherung von Wasserstoff und Einspeisung ins Energienetz
- Investitionen in Flotten von Nutzfahrzeugen im Waren- und Güterverkehr
- Errichtung eines Wasserstofftankstellennetzes

Basis/Grundlage/Motivation:

Clean Hydrogen Coastline legt den norddeutschen Grundstein für eine europäische Wasserstoffwirtschaft. Es ist ein Verbund aus den Industriepartnern ArcelorMittal Bremen, EWE, FAUN, Gasunie, swb und TenneT, die alle im Bereich der gesamten Wertschöpfungskette von der Wasserstoffwirtschaft profitieren. Bis zum Jahr 2026 wollen die Unternehmen bis zu 400 Megawatt Elektrolysekapazität mit entsprechender Speicherung von Wasserstoff zielgerichtet ins Energiesystem integrieren. Der z.B. durch Offshore-Strom erzeugte Wasserstoff soll u.a. für die klimaneutrale Stahlerzeugung am Standort Bremen eingesetzt werden. Außerdem kann mit Clean Hydrogen Coastline die Grundlage geschaffen werden, um bis 2026 bis zu 12.000 wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge in Betrieb zu nehmen. Die Optimierung der Gasinfrastrukturen für Wasserstoff im Nordwesten würde eine Verbindung für das grüne Gas zwischen den Niederlanden, Deutschland und Dänemark ermöglichen.⁵⁷

Investitionen:

Investitionsvolumen:	ca. 1,30 Milliarden Euro
Einsparpotential:	über 8 Mio. Tonnen CO₂e

Umsetzung:

Elektrolysekapazitäten und Speicherung

In der Region entstehen bis zum Jahr 2026 Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von 200 MW – mit optionaler Ausbaustufe bis 400 MW – am Standort Bremen mit direkter Nähe zum Stahlwerk als Verbraucher und in Huntorf mit direkter Anbindung an den Kavernenspeicher. Der Kavernenspeicher soll ausreichend Flexibilität für einen netzdienlichen Betrieb der Elektrolyse bei gleichzeitiger Versorgungssicherheit auf der Anwenderseite sicherstellen. Im Nordwesten steht hierfür eine wachsende Menge an grünem Strom bereit. Perspektivisch kann die Leistung ab 2030 in den Gigawatt-Bereich hochgefahren werden. Bereits kurzfristig lassen

⁵⁷ (72)

sich wichtige Absatzmärkte in Industrie und Verkehr mit grünem Wasserstoff aus heimischer Produktion versorgen. In Kombination mit der Gasinfrastruktur kann eine sinnvolle und wirtschaftliche Integration von Wasserstoff als Energieträger gelingen.

Bis zum Jahr 2025 soll über Ferngasleitungen eine Verbindung wichtiger Produktions- und Speicherstandorte mit relevanten Absatzmärkten in Niedersachsen, Bremen und Hamburg geschaffen werden. In Zusammenarbeit mit dem Projekt „HyPerLink“ ist das Ziel, eine Verbindung zwischen den Niederlanden, Deutschland und Dänemark zu schaffen.⁵⁸

Wasserstofftankstellen

8.000 Lkw, Busse, Züge und weitere Schwerlastfahrzeuge werden zur Betankung mit Wasserstoff auf eine dezentrale Tankstelleninfrastruktur zurückgreifen können.⁵⁹

Synergieeffekte zu H2BrakeCO2:

Der von der EWE betriebene Erdgas-Kavernenspeicher in Huntorf (Elsfleth) wird auf Wasserstoff umgerüstet und bietet damit nicht nur dem Projekt Clean Hydrogen Coastline eine Möglichkeit Wasserstoff in großen Mengen einzuspeichern. Kavernenspeicher sind unterirdische Hohlräume in mineralischem Gestein, welche sich ideal zur Speicherung von Gasen eignen. In Huntorf befindet sich zudem ein Druckluftspeicherwerk, mit dem mittels Druckluft Strom aus dem ehemaligen Kernkraftwerk Unterweser in Esenshamm zwischengespeichert werden könnte. Durch den Rückbau des Kernkraftwerks und der noch vorhandenen Infrastruktur in Huntorf eignet sich der Standort ideal für die Installation hoher Wasserstofferzeugungskapazitäten, wovon die gesamte Region und insbesondere die Stadt Brake profitieren wird.

Energiewendedrehkreuz Wesermarsch

Ziel:

- Integration und Speicherung von Wasserstoff zur Dekarbonisierung innerhalb einer Wertschöpfungskette in der praktischen Anwendung.

Basis/Grundlage/Motivation:

⁵⁸ (73)

⁵⁹ (74)

- Der Landkreis Wesermarsch soll zum Modellfall im Nordwesten Niedersachsens werden und umfassende Standortkriterien für die Schaffung von Wasserstoff-Hubs in der Praxis liefern.

Investitionen:

Status:	In der Antragstellung
Investitionsvolumen:	? Euro
Fördersumme:	? Euro

Umsetzung:

Es soll eine Analyse der Standortbedingungen für die Schaffung einer kompletten Wertschöpfungskette zum grünen Wasserstoff im Landkreis Wesermarsch erfolgen. Hierzu zählen die Erzeugung, die Speicherung, der Transport/Verteilung und die Anwendungssektoren/Nutzer. Eingeschlossen sind hier auch die rechtlichen Bewertungen und die gesellschaftlichen Akzeptanzproblematiken.⁶⁰

Synergieeffekte zu H2BrakeCO2:

Das Projekt Energiewendedrehkreuz Wesermarsch leistet einen wichtigen Beitrag zur Sichtbarkeit der Wesermarsch als Wasserstoffregion in der Bundesrepublik und der Annahme der Wasserstofftechnologien durch die lokalen Unternehmen. Zudem hat es das Potential, Lücken in der Infrastruktur zu identifizieren und zu schließen. Damit trägt es zur Stabilität und Stärkung der Wasserstoffwirtschaft in der Region bei.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Projekte in der Metropolregion Nordwest themenübergreifend sehr ähnlich arbeiten. Außerdem ist ersichtlich, dass viele Projekte die gleiche Basis/Ausgangslage schaffen müssen, um ihre Ziele umzusetzen. Hierzu zählen z.B. die richtige Standortfindung, die Herstellung, Speicherung und Verteilung des Wasserstoffs, ein auf wasserstoffbasierter Fahrzeugbestand mit dazugehöriger Betankungsmöglichkeit. Da einige Unternehmen in mehreren Projekten mitarbeiten und involviert sind, haben diese den Einblick über mehrere Wasserstoffaktivitäten. Diese Vorteile sollten die Projekte untereinander nutzen und die Kompetenzen bündeln, um sich so gegenseitig besser auszutauschen und von den Vorteilen der jeweiligen anderen Projekte zu profitieren.

⁶⁰ (75)

4 Methodenbasierte Aufnahme der Wasserstoffanwendungsfälle

Die methodenbasierte Aufnahme dient der Erhebung aller Informationen, die für die Erstellung des vorliegenden Gesamtkonzepts von Nutzen sind. Aufbauend auf dem Ist-Zustand sollen im Rahmen von Experteninterviews und Workshops unter Einbezug aller Projektpartner und den betroffenen Akteuren, sowie durch Besichtigungen vor Ort die Realisierungsmöglichkeiten für den Einsatz von Wasserstoff in den Straßengüter- und Hafenlogistikprozessen erarbeitet werden.

4.1 Gewählte Methode zur Aufnahme der Wasserstoffanwendungsfälle

Da zum Zeitpunkt der Konzepterstellung im Zuge der COVID-19 Pandemie von direkten persönlichen Interviews abgesehen werden musste, wurden für die Durchführung der methodenbasierten Aufnahme Fragebögen entwickelt, die von den Unternehmen über einen Zeitraum von mehreren Wochen bearbeitet wurden. Dabei fand ein ständiger Austausch mit den Bearbeitern statt, sodass getätigte Antworten vertieft und diskutiert und schlussfolgernd die Qualität der Aussagen optimiert werden konnte.

4.1.1 Auswahl der zu befragenden Unternehmen

Die Auswahl der zu befragenden Unternehmen fand nach mehreren Kriterien statt. Bedingt durch die Fokussierung auf die Hafen- und Straßengüterlogistik, die das Projekt H2BrakeCO2 vorsieht, wurden nur solche Unternehmen in die Befragung aufgenommen, die diesen beiden Sektoren zuzuordnen sind.

Des Weiteren weisen die befragten Unternehmen die Gemeinsamkeit auf, dass ein enger Bezug zur Wesermarsch, der Stadt Brake und dem Hafen der Stadt Brake besteht. Die Unternehmen besitzen Niederlassungen in der Stadt Brake oder dem nahen Umfeld und/oder verkehren täglich im Hafen der Stadt, von wo aus sie die umgeschlagenen Güter zu ihren nahegelegenen Niederlassungen abtransportieren. Darüber hinaus besteht seitens der Unternehmen das Interesse, das Projekt H2BrakeCO2 mit dem Austausch von Informationen zu unterstützen. Im Interesse der Unternehmen und zur Wahrung des Datenschutzes wird bei der Darstellung der Ergebnisse keine Namensnennung der betreffenden Unternehmen durchgeführt. Insgesamt wurden 15 Unternehmensbefragungen durchgeführt.

4.2 Auswertung der Ergebnisse für die Hafen- und Logistikprozesse

Im Rahmen der Befragung wurde auch das Vorhandensein von Nachhaltigkeits- und Energieberichten in den Unternehmen überprüft. Abbildung 20 zeigt auf, dass lediglich 40% der befragten Unternehmen Nachhaltigkeitsberichte erstellen. Für 33% der Unternehmen konnten diesbezüglich keine Angabe erfasst werden.

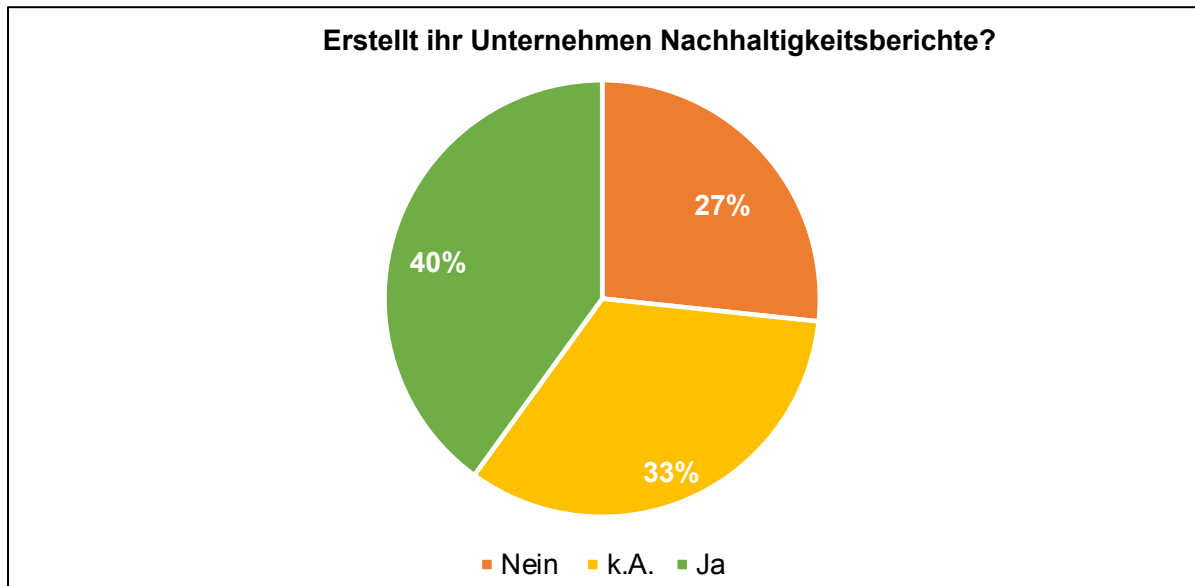


Abbildung 20: Anteil der befragten Unternehmen, der Nachhaltigkeitsberichte erstellt

Jedoch sind Nachhaltigkeitsberichte ein wichtiges Instrument, durch das die nachhaltige Entwicklung eines Unternehmens öffentlichkeitswirksam darstellt und veröffentlicht werden kann. Zumal existieren auch für die bisweilen von den fossilen Brennstoffen abhängige Logistikbranche weitaus mehr Möglichkeiten zur nachhaltigeren Ausrichtung der Unternehmen, als die einfache Reduzierung der fossilen Energiebedarfe. Auch soziale Aspekte, wie faire Arbeitsbedingungen, Bezahlungen und Arbeitszeiten sowie ein angenehmes Arbeitsklima im Unternehmen werden über die Erstellung eines Nachhaltigkeitsberichts entsprechend den GRI-Standards⁶¹ erfasst und nach Außen kommunizieren.

Neben der Reduzierung fossiler Brennstoffe bietet sich auf ökologischer Ebene zur weiteren Steigerung der Ressourceneffizienz die Einsparung von Papier- und Verpackungsmüll sowie die Prozessoptimierung und damit die Senkung des Material-, Wasser und Energiebedarfs an. Diesbezüglich bildet die Digitalisierung den zentralen Enabler.

Abbildung 21 zeigt auf, dass 53% der befragten Unternehmen neben einem Nachhaltigkeitsbericht auch Energieberichte führen.

⁶¹ (122)

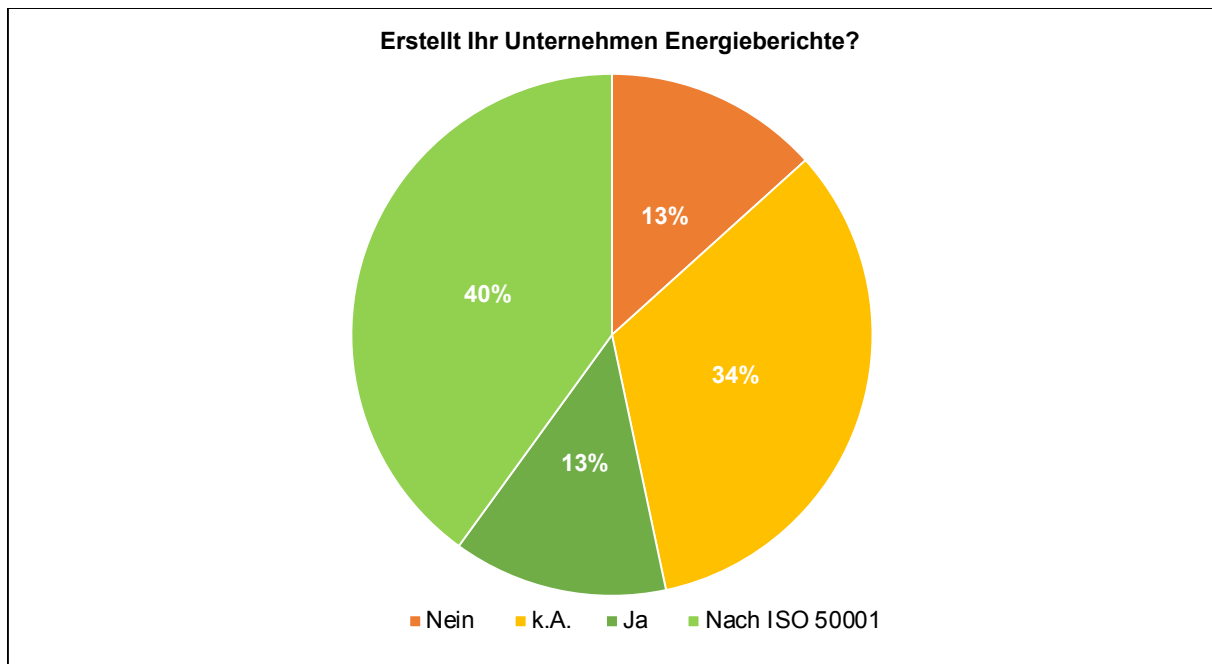


Abbildung 21: Anteil der befragten Unternehmen, der Energieberichte erstellt

40% aller Unternehmen haben diesen im Rahmen ihrer ISO 50001 Zertifizierung erstellt. Die ISO 50001 Zertifizierung beinhaltet, dass Unternehmen über ihren eigenen Energiebedarf hinaus überlegen müssen, welche externen Anforderungen und Risiken bestehen. Risiken und Chancen sollten als Teil der strategischen Ausrichtung auf hoher Ebene betrachtet werden, um sicherzustellen, dass die Grundsätze des Energiemanagements in die Organisationsstruktur integriert werden.⁶²

4.3 THG-Einsparpotentiale der Hafen und Logistikprozesse

Neben Fragestellungen zu dem Ist-Zustand der Unternehmen hinsichtlich ihrer nachhaltigen Ausrichtung und der allgemeinen Bereitschaft zu einer Beteiligung am Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur wurde mit der Befragung die Grundlage für die Quantifizierung des aus Transport- und Umschlagprozessen hervorgehenden Potentials zur Dekarbonisierung des Untersuchungsgebiets und zur Identifikation möglicher Anwendungsfelder der Wasserstofftechnologie gebildet.

Wie aus Abbildung 22 hervorgeht führen 34% der Unternehmen keine Ermittlung der durch ihr Unternehmen emittierten CO₂e durch. 33% aller befragten Unternehmen führen eigene THG-Emissionserfassungen durch, auf die im Rahmen der Ermittlung des THG-Einsparpotentials des Untersuchungsgebietes zugegriffen werden konnte. Weitere 33% konnten zu diesem Punkt keine Angaben machen.

⁶² (44)

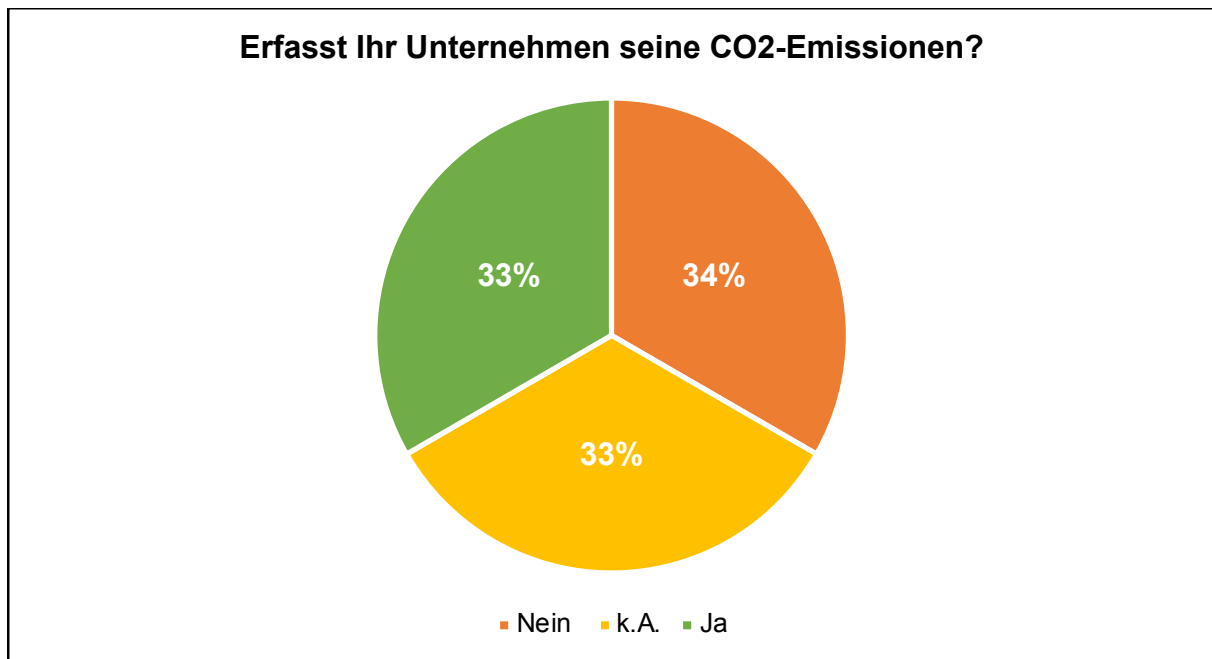


Abbildung 22: Anteil der befragten Unternehmen, die ihre THG-Emissionen erfassen

Um die durch Verbrennung fossiler Energiequellen emittierten Treibhausgase im Bereich Transport ermitteln zu können, wurden Informationen über die Fahrzeuge und Umschlaggeräte eines jeden beteiligten Unternehmens erhoben. Folgende Parameter wurden zur Erhebung der THG-Emissionen angefragt:

- Fahrzeugart
- Einsatzzweck
- Gesamtfahrleistung [km]
- Gesamtfahrleistung [h]
- Kraftstoffbedarf oder Energiebedarf pro km oder h

Basierend auf dieser Datengrundlage konnten folgende Angaben zu jedem einzelnen Fahrzeug oder Umschlaggerät rechnerisch ermittelt werden:

- Gesamtkraftstoffbedarf Diesel [l]
- Gesamtstrombedarf [kWh]
- Gesamtenergiebedarf Diesel [MJ]
- Gesamtenergiebedarf Strom [MJ]
- CO₂-Ausstoß pro Jahr [t CO₂e]

Tabelle 16 zeigt eine Übersicht der in der Unternehmensbefragung erhobenen Fahrzeuge. Insgesamt konnten Daten zu 380 Fahrzeugen verschiedener Art gesammelt werden. Im Jahr 2019 hatten diese Fahrzeuge insgesamt einen Kraftstoffbedarf von **8.671.233,51 Litern Diesel**. Diesbezüglich ist zu beachten, dass es sich bei dem Kraftstoffbedarf der Schiffe um Angaben in Litern Marine Diesel, sowie bei zwei markierten Angaben um Gas-To-Liquid (GTL)

und Marine Gas Oil Verbräuchen handelt. Zuzüglich wurde ein Netzstrombedarf der elektrisch betriebenen Fahrzeuge von **4.509.778,95 kWh oder 4,51 GWh** ermittelt.

Tabelle 16: Übersicht der in der Unternehmensbefragung erhobenen Fahrzeuge und Umschlaggeräte

Übersicht der erhobenen Fahrzeuge mit den zugehörigen Werten aus 2019						
Fahrzeugart	Fahrzeugtyp	Anzahl	Diesel-Bedarf [Liter]	Strom-bedarf [kWh]	CO ₂ -Ausstoß [t CO ₂ e]	Ø CO ₂ -Ausstoß [t CO ₂ e]
Flurförderfahrzeuge		57	560.454,42	4.904,20	1.767,40	31,01
Gabelstapler	Tragfähigkeit: 3 bis 28 t	41	466.657,70	4.904,20	1.471,94	
Zugmaschinen		9	21.449,30	-	67,57	
Reachstacker	45 Tonner	7	72.347,42	-	227,89	
Krane		4	165.168,20	-	520,28	130,07
Kran	Mobilkran	4	165.168,20	-	520,28	
Bagger		25	626.375,00	-	1.973,08	78,92
Bagger	Raupe	9	189.000,00	-	595,35	
Bagger	Radlader	13	318.000,00	-	1.001,70	
Bagger	Bobcat	1	1.875,00	-	5,91	
Bagger	Raupenbagger	2	117.500,00	-	370,13	
LKW		154	6.172.838,19		19.444,44	126,26
LKW	Zul. GG 7,5 t	1	729,54	-	2,30	
LKW	Zul. GG 12 t	1	1.174,58	-	3,70	
LKW	Zul. GG 40 t	152	6.170.934,07	-	19.438,44	
PKW		110	114.988,71	4874,75	364,17	3,31
PKW	Dienst PKW	48	82.650,00	-	260,35	
PKW	Betriebs-fahrzeug	56	28.999,87	2.986,50	92,55	
PKW	Poolfahrzeug	6	3.338,84	1.888,25	11,27	
Schienenfahrzeuge		3	390.000,78	-	1.228,50	409,50
Lokomotiven	Rangier-lokomotiven	3	390.000,78	-	1.228,50	
Schiffe		23	634.617,00	-	2.235,88	97,21
Arbeitsschiff	Peilboot	3	32.377,00	-	114,29	
Arbeitsschiff	Schlepper	10	170.950,00	-	603,45	
Arbeitsschiff	Bunkerschiff	2	82.702,00**	-	288,63	
Arbeitsschiff	Gewässer-kundeschiff	1	14.706,00	-	51,91	
Arbeitsschiff	Tonnenleger	1	7.353,00	-	25,96	
Arbeitsschiff	Versorgungs-schiff	2	10.294,00	-	36,34	
Arbeitsschiff	Ufersicherungs-schiff	2	88.235,00	-	311,47	
Fähre	Personenfähre	1	8.000,00*	-	27,23	
Fähre	Personen- und Fahrzeugfähre	1	220.000,00	-	776,60	
Sonderfahrzeuge		4	8.259,33	4.500.000	1.825,89	456,47
Schüttgut-förderer	Saugheber	2	-	4.500.000	1.804,50	
Reinigungs-fahrzeug	Kanalspülgerät	1	535,86	-	1,69	
Reinigungs-fahrzeug	Kehrmaschine	1	6.254,85	-	19,70	
Gesamtanzahl aller erhobenen Fahrzeuge		380	8.671.233,51	4.509.778,95	29.359,65	77,26

*Angabe in Litern Gas-To-Liquid ** Angabe in Litern Marine Gas Oil

In Abbildung 23 wird die Aufteilung der Gesamtfahrzeuganzahl in die verschiedenen Fahrzeuggruppierungen aufgezeigt. Mit 40% stellen die LKWs den Hauptanteil der identifizierten Fahrzeuge. An zweiter Stelle sind die PKWs mit 29% einzuordnen, gefolgt von den Flurförderfahrzeugen mit 15%. Die Fahrzeuggruppierungen Bagger, Schiffe, Krane, sowie Rangierlokomotiven und Sonstige, unter denen die Saugheber und Reinigungsmaschinen einzuordnen sind, liegen unter 10%. Die jeweilige zu den Fahrzeuggruppierungen zugehörige Treibhausgasemission ist Abbildung 28 zu entnehmen.

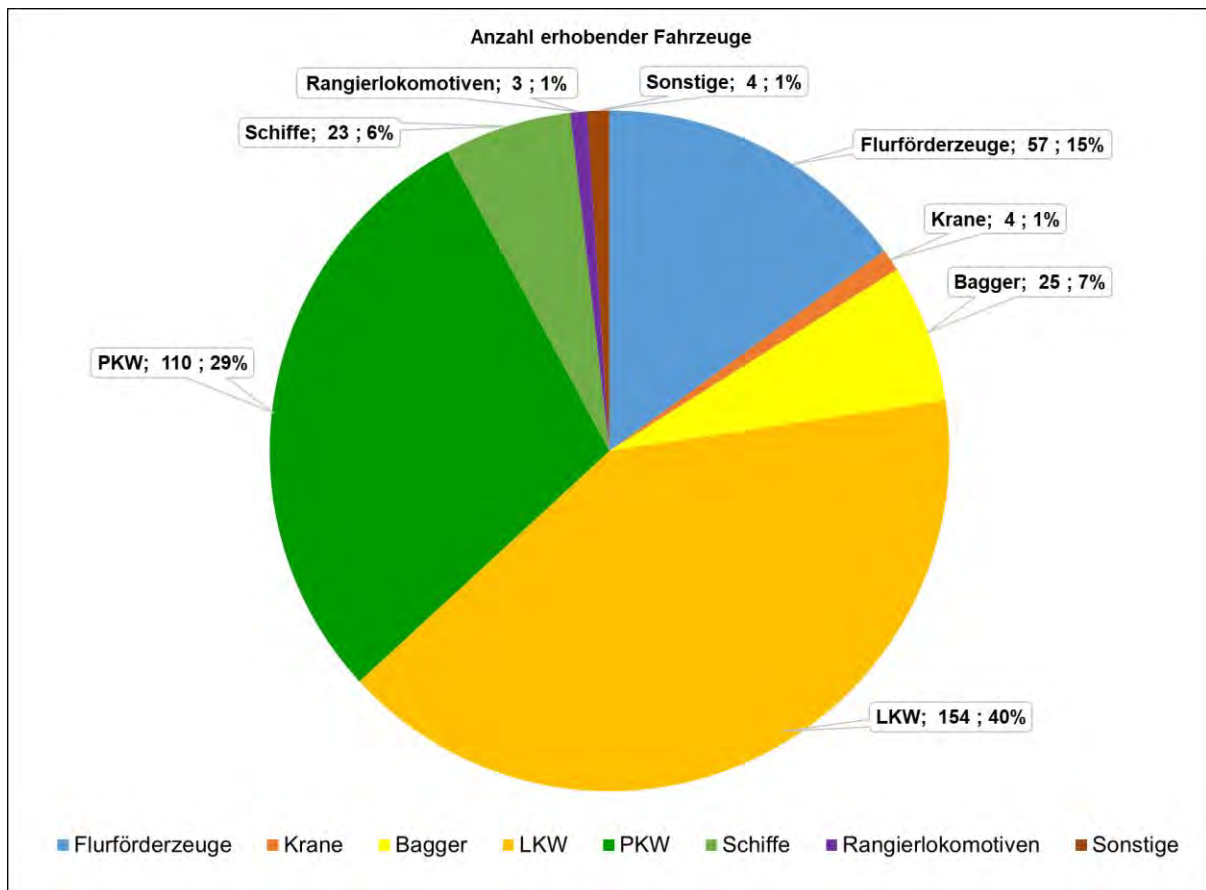


Abbildung 23: Zahlenmäßige Aufteilung der im Untersuchungsgebiet erhobenen Fahrzeuge

Die Berechnung der durch die Fahrzeuge emittierten Treibhausgasemission basiert auf den Vorgaben des Leitfadens zur Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258 des „DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.“.⁶³ In dem Leitfaden wird im Wesentlichen der Well-to-Wheel-Ansatz gewählt und daher wurden auch in diesem Projekt diese Systemgrenzen entsprechend des DIN-Standards gewählt. Es gilt aber festzustellen, dass bei einer Cradle-to-Grave-Betrachtung, die auch das jeweilige Fahrzeug mit seinen Emissionen für Rohstoffe, Produktion und Entsorgung einbezieht, für Batterie und Brennstoffzelle zusätzliche und damit auch höhere Emissionen für die drei genannten Bereiche mit vergleichbaren Dieselfahrzeugen angesetzt werden müssten. In der

⁶³ (45)

Well-to-Wheel Betrachtung, die den Treibhausgasausstoß einer Energiequelle über ihre gesamte Wertschöpfungskette quantifiziert, entsteht bei der Verbrennung eines Liters Dieseldienststoffs eine Treibhausgasemission von **3,15 kg CO₂e**. Des Weiteren wurde sich für die Berechnung der Schiffsemissionen auf die Treibhausgasemissionsfaktoren (THG-Faktor) von Marine Diesel von **3,53 kg CO₂e** pro Liter und Marine Gas Oil von **3,49 kg CO₂e** pro Liter bezogen. Die diesbezügliche Berechnung der Treibhausgasäquivalente pro Jahr beruht auf folgender verbrauchsbasierter Formel:

$$THG_{Emissionen} \left[\frac{kg CO_2e}{a} \right] = Kraftstoffverbrauch \left[\frac{l}{a} \right] \times THG_{Faktor} \left[\frac{kg CO_2e}{l} \right]$$

Da der Leitfaden des DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. keine Referenzdaten für Gas-To-Liquid Emissionsberechnungen vorsieht, wurde sich diesbezüglich an einer anderen Quelle orientiert. Somit wurde für die mit GTL betriebene Fähre die THG-Emission über die Angabe des Heizwertes von GTL berechnet. Der „Shell GTL Fuel Benefits Guide“⁶⁴ nennt einen Treibhausgasemissionsfaktor für GTL von 94,3 gCO₂e/MJ und einen Heizwert von 36,1 MJ/l. Folgende Formel liegt der Berechnung für die jährliche CO₂e-Emission der GTL-Fähre zu Grunde:

$$THG_{Emissionen} \left[\frac{g CO_2e}{a} \right] = Kraftstoffverbrauch \left[\frac{l}{a} \right] \times Heizwert \left[\frac{MJ}{l} \right] \times THG_{Faktor} \left[\frac{g CO_2e}{MJ} \right]$$

Ein mit Netzstrom geladenes oder betriebenes Fahrzeug ist während seines Einsatzes zwar emissionslos, jedoch darf die Treibhausgasemission bei der Erzeugung des Stroms nicht vernachlässigt werden. Je nach herangezogener Quelle variieren die Angaben zu der indirekten Treibhausgasemission von Netzstrom. Für die Berechnungen der strombedingten indirekten Treibhausgasemissionen in Tabelle 16 wurden Angaben der Umweltbundesamtes verwendet, nach denen der Verbrauch einer Kilowattstunde Stroms in Deutschland im Jahr 2019 durch den Anteil an fossiler Stromgewinnung eine Treibhausgasemission von **401 g CO₂e** verursacht.⁶⁵ Die Summe der errechneten CO₂e aus dem beanspruchten Kraftstoffverbrauch für das Jahr 2019, sowie des genutzten Netzstroms, ergibt eine jährliche THG-Emission von **29.359,65 t CO₂e**. Diese Angabe stellt den Ist-Zustand des Untersuchungsgebiets hinsichtlich seines THG-Einsparpotentials dar.

Zur weiteren Priorisierung der später herauszuarbeitenden Anwendungsfälle der Wasserstofftechnologie zur Dekarbonisierung der Hafen- und Straßengüterlogistik werden im Folgenden die Emissionen der einzelnen Teilbereiche im Detail betrachtet. Dabei werden ausschließlich die Treibhausgasemissionen der an diesen Prozessen beteiligten Fahrzeuge

⁶⁴ (47)

⁶⁵ (46)

ermittelt. Emissionen aus der Deckung des Strom- und Wärmebedarfs angrenzender Gebäude, Lagerhallen oder Unternehmensniederlassungen werden im Rahmen dieses Konzeptes nicht behandelt. Hierfür wird auf das Strategiekonzept zur Neuausrichtung der zukünftigen grünen Energiewirtschaft im Landkreis Wesermarsch verwiesen, in dem die THG-Emissionen für alle Sektoren untersucht wurden.⁶⁶

4.3.1 THG-Einsparpotentiale der Umschlagprozesse im Hafen von Brake

Zu den an den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake beteiligten Fahrzeuge werden in diesem Gesamtkonzept sämtliche Flurförderfahrzeuge, Krane, Rangierlokomotiven, Bagger und die zum Entladen der Schüttgutfrachter eingesetzten Saugheber gezählt.

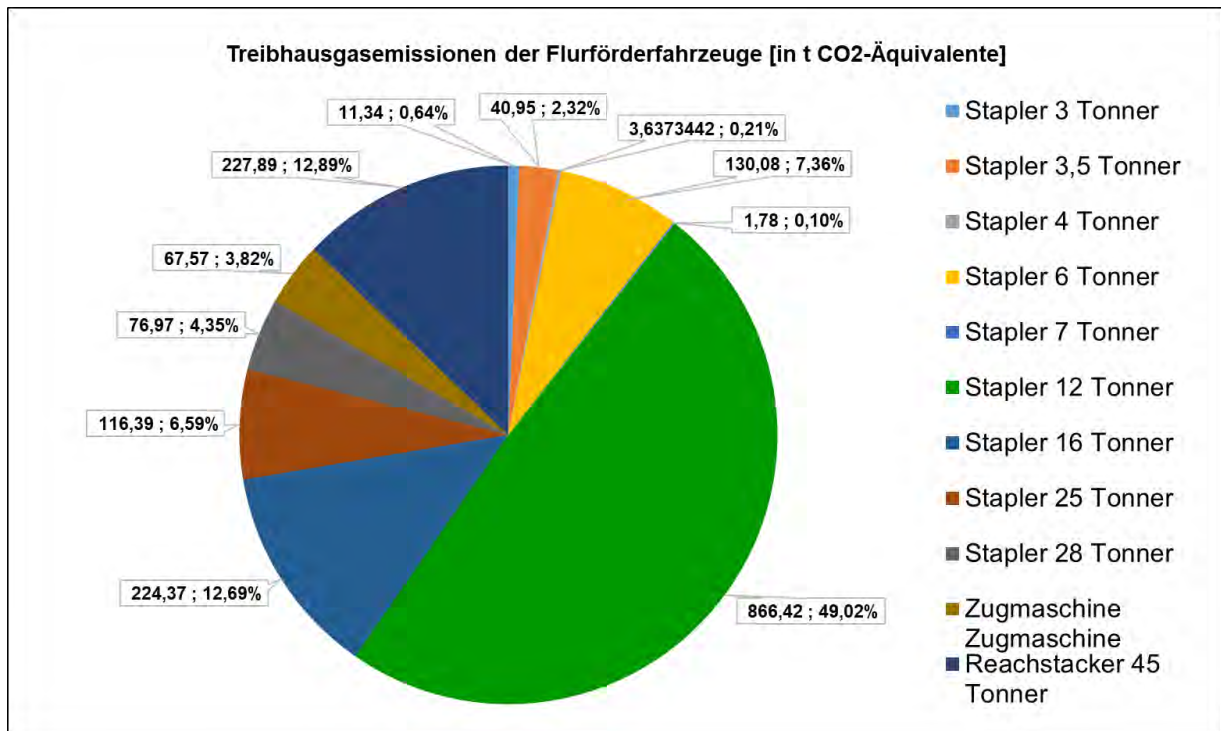


Abbildung 24: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Flurförderfahrzeuge in Höhe von 1.767,40 t CO₂e nach Traglasten

Abbildung 24 veranschaulicht die hohe Diversität der Flurförderfahrzeuge und gibt gleichzeitig Aufschluss über das steigende Einsparpotential der Treibhausgasemissionen bei zunehmender Traglast. Die 12 t Gabelstapler tragen dabei aufgrund ihrer hohen Stückzahl mit nahezu 50% zu der Gesamtemission der Flurförderfahrzeuge bei.

⁶⁶ (23)

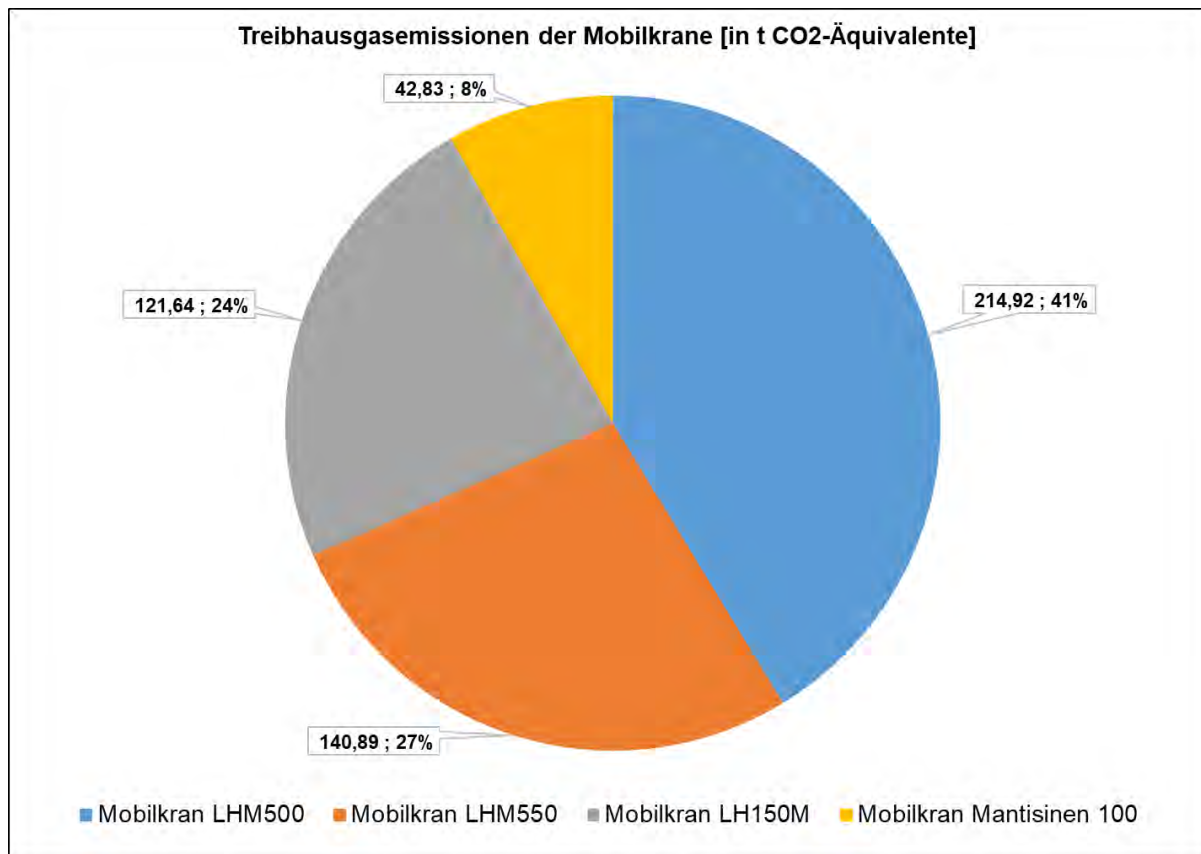


Abbildung 25: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Mobilkrane in Höhe von 520,28 t CO₂e

Wie Abbildung 25 zeigt, trägt der Mobilkran LHM500 41% zu der jährlichen Treibhausgasemission der Mobilkrane bei. Dies lässt sich auf seinen hohen Verbrauch von ca. 50 Litern Diesel pro Stunde zurückführen. Die anderen Krantypen verbrauchen zwischen 25 bis 30 Liter Diesel pro Stunde. Für das Jahr 2019 lagen die Gesamtbetriebsstunden der Krane bei bis zu 1500 Stunden pro Jahr.

Zusätzlich zu den Flurförderfahrzeugen und den Kranen sorgen drei Rangierlokomotiven für den Erhalt des Hafenbetriebes in Brake. Diese emittieren gemeinsam eine jährliche Treibhausgasemission von 1.228,50 t CO₂e. Die Emission verteilt sich zu gleichen Teilen auf die drei Lokomotiven, sodass an dieser Stelle auf eine grafische Darstellung verzichtet wird. Dies gilt ebenfalls für die Saugheber, die zu gleichen Teilen an der jährlich verursachten Treibhausgasemission von 1.804,50 t CO₂e beteiligt sind. Die Treibhausgasemission ergibt sich aus dem Betrieb mit Netzstrom. Im Braker Hafen kommen die Saugheber beim Entladen von Schüttgutfrachtern zum Einsatz und befördern die angelieferten Getreide und Futtermittel direkt aus dem Laderaum der Schiffe in die angrenzenden Silos.

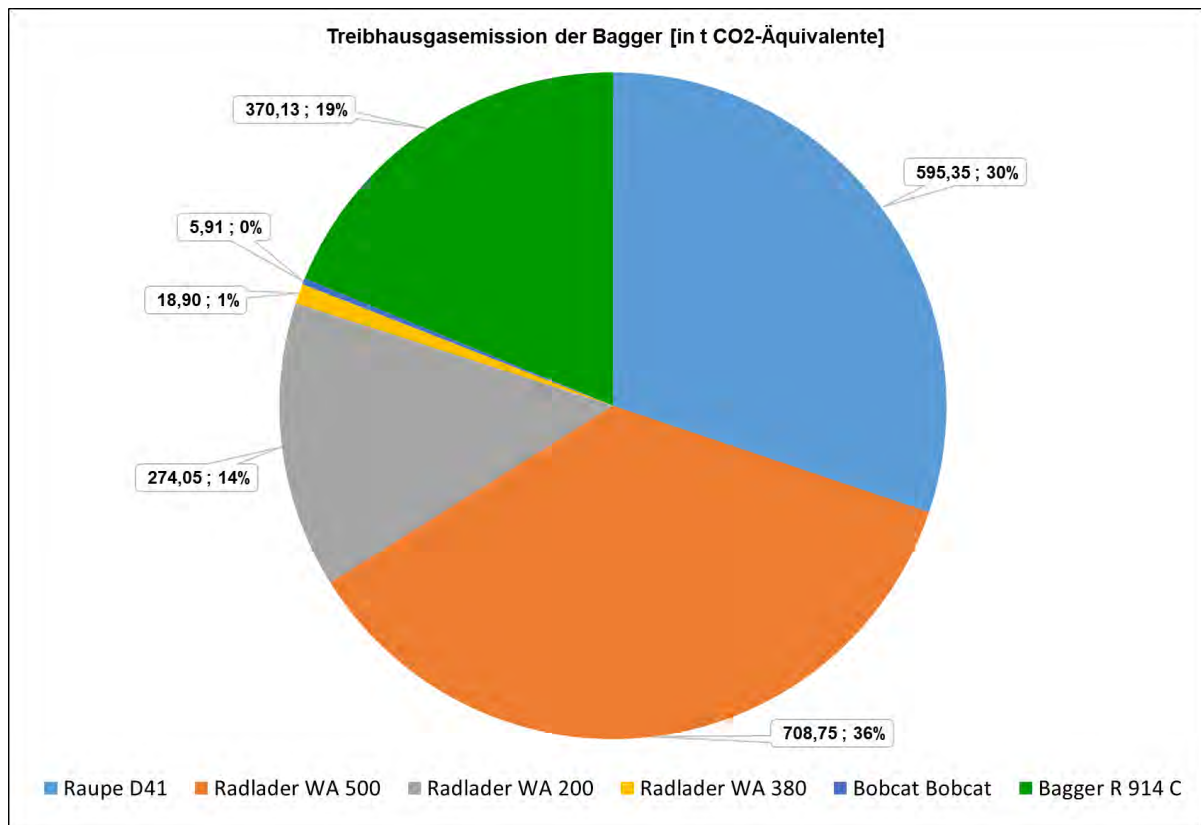


Abbildung 26: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Bagger in Höhe von 1.973,08 t CO₂e

Der Umschlag von Schüttgut wird durch den Einsatz von Baggern umgesetzt. Die maßgeblichen Prozesse setzen sich aus dem Zusammenschieben von Schüttgut in den Lagerhallen und den Entladevorgängen in den Laderäumen der Schiffe zusammen. Letzteres ist notwendig, damit auch die Schüttgutreste von den Saughebern erfasst werden können. Durch Abbildung 26 wird veranschaulicht, dass unter der Gruppierung der Bagger die Raupen des Typs D41 und Radlader des Typs WA 500 maßgeblich zu der Höhe der Treibhausgasemissionen beitragen.

4.3.2 THG-Einsparpotentiale der LKW-Transporte in und aus dem Hafen

Wie bereits in Abbildung 23 aufgezeigt, bilden die LKWs mit 154 Stück und einem Anteil von 40% die höchste Anzahl der erhobenen Fahrzeuge. Durch ihren vergleichsweise hohen Dieserverbrauch/100km stehen die LKWs auch bezogen auf die verbrauchten Kraftstoffmengen (6.172.838,19 Liter Diesel (2019)) und die emittierten Treibhausgasemissionen (19.444,44 t CO₂-Äquivalente (2019)) an oberster Stelle. Somit stellt die Umstellung der LKW das größte THG-Einsparpotential innerhalb des Untersuchungsgebietes dar. Diese Feststellung geht konform mit dem bereits in der Einleitung

dargestellten besonderen Potential von schweren Lkw (s. Abbildung 6) bei der Erreichung der Klimaziele.

4.3.3 THG-Einsparpotentiale der Schiffsverkehre im Hafen von Brake

Die Schiffsverkehre besitzen im Projekt H2BrakeCO2 eine gesonderte Rolle. Das übergeordnete Ziel des Projektes wird maßgeblich durch die Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Untersuchungsgebiet widergespiegelt. Da das Projektziel unter Ausarbeitung konkreter Umsetzungspläne und in Zusammenarbeit mit den Akteuren vor Ort bewerkstelligt werden soll, werden die den Hafen anlaufenden See- und Binnenschiffe nicht in die Betrachtung der einzusparenden Treibhausgasemissionen einbezogen.

Eine Ausnahme für die Betrachtung der durch Schiffe verursachten Treibhausgasemission im Untersuchungsgebiet stellen Arbeits- und Hilfsschiffe sowie Fähren dar. Abbildung 27 zeigt auf zu welchen Teilen die verschiedenen Schiffstypen zu der jährlichen THG-Emission im Bereich der Schifffahrt beitragen.

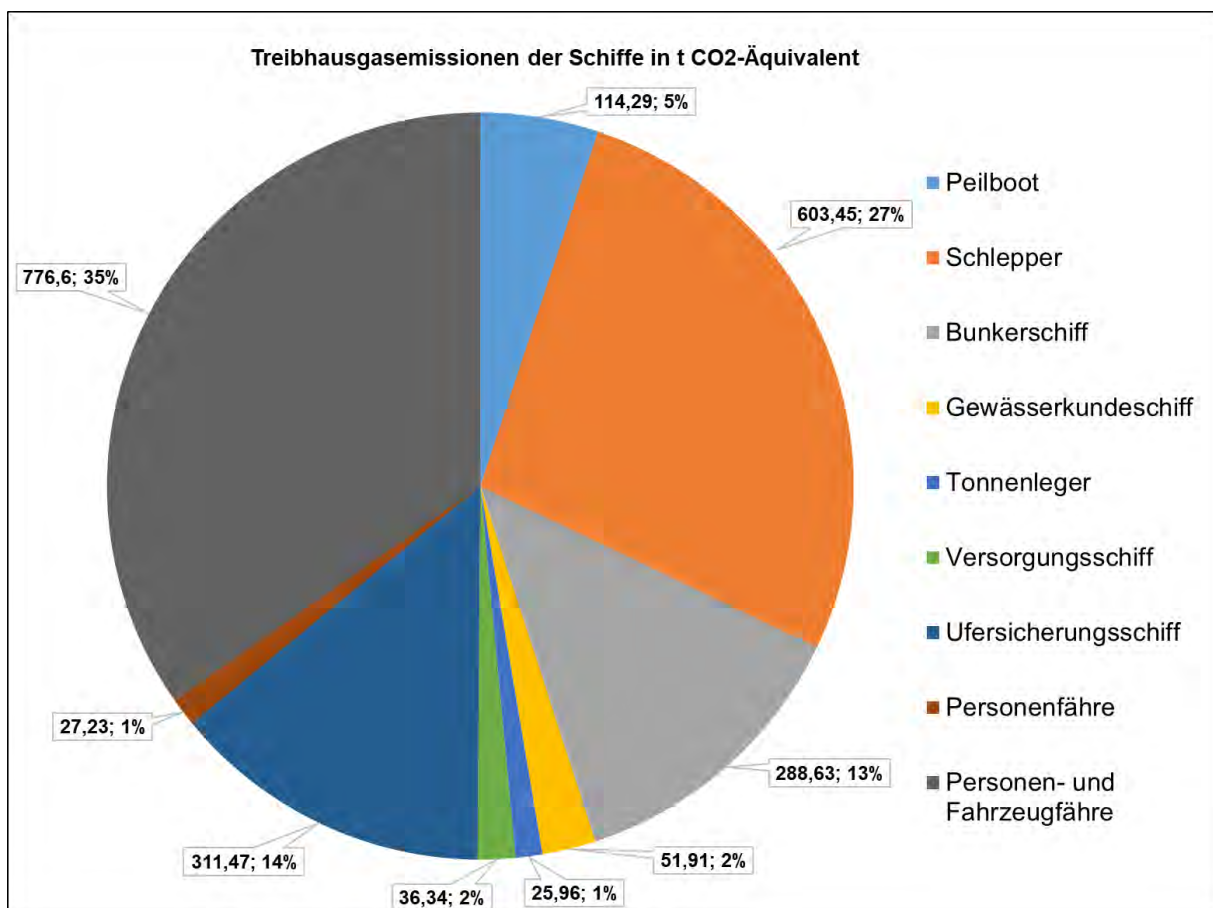


Abbildung 27: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Schiffe in Höhe von 2.235,88 t CO₂e

Der Hauptteil der Treibhausgasemissionen im Sektor Schifffahrt wird durch die Personen- und Fahrzeugfähre „Kleinsiel“ mit 35% und **776,6 tCO₂e** pro Jahr ausgestoßen, welche täglich

zwischen Brake und Sandstedt pendelt. An zweiter Stelle sind die Schlepper mit 24% und **603,45 tCO₂e** pro Jahr platziert. 13% und 14% der wasserseitigen THG-Emissionen werden durch die Ufersicherungs- und Bunkerschiffe dargestellt. Die restlichen Anteile ergeben sich aus den THG-Emissionen des Betriebes der Personen- und Fahrradfähre „Guntsiet“, welche zwischen dem Braker Fähranleger und Harriersand bis zu 120 Personen gleichzeitig befördert und im Jahr durchschnittlich **27,23 tCO₂e** emittiert, sowie eines Gewässerkundeschiffes, dreier Peilboote, zweier Versorgungsschiffe und eines Tonnenlegers.

4.3.4 THG-Einsparpotentiale durch Landstromversorgung im Hafen von Brake

Auch wenn die See- und Binnenschifffahrt innerhalb des Projektes zunächst außerhalb der Betrachtungsgrenzen steht, ist die Berücksichtigung des THG-Einsparpotentials durch Landstromversorgung nicht zu vernachlässigen. Heute wird jedoch der Strombedarf für die elektrischen Einrichtungen an Bord und der Wärmebedarf für die Unterkünfte der Besatzung während der Liegezeit eines Schiffs im Hafen über Hilfsaggregate (in der Regel dieselbetrieben) gedeckt. Die gesicherte Erhebung der zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen benötigten Informationen über die genauen Leistungen und Kraftstoffbedarfe der auf den Schiffen installierten Hilfsaggregate ist den Erstellern dieses Gesamtkonzepts bei einer Anzahl von 964 Seeschiffs- und 1518 Binnenschiffseinläufen pro Jahr mit verschiedensten Dimensionen und Brutraumzahlen nicht möglich gewesen.

Dennoch wird das Thema Landstromversorgung im Hafen von Brake im Projekt H2BrakeCO₂ und dem vorliegenden Gesamtkonzept mit den dadurch entstehenden Treibhausgaseinsparpotentialen nicht ignoriert. Die dazu erarbeiteten Inhalte werden in dem Kapitel 5.4 ausführlich behandelt und die anzunehmenden Treibhausgasemissionen näherungsweise ermittelt.

4.3.5 Fazit der THG-Einsparpotentiale des Untersuchungsgebiets

Werden die Treibhausgasemissionen der verschiedenen Fahrzeugtypen zusammenfassend dargestellt, ergibt sich daraus die nachstehende Grafik:

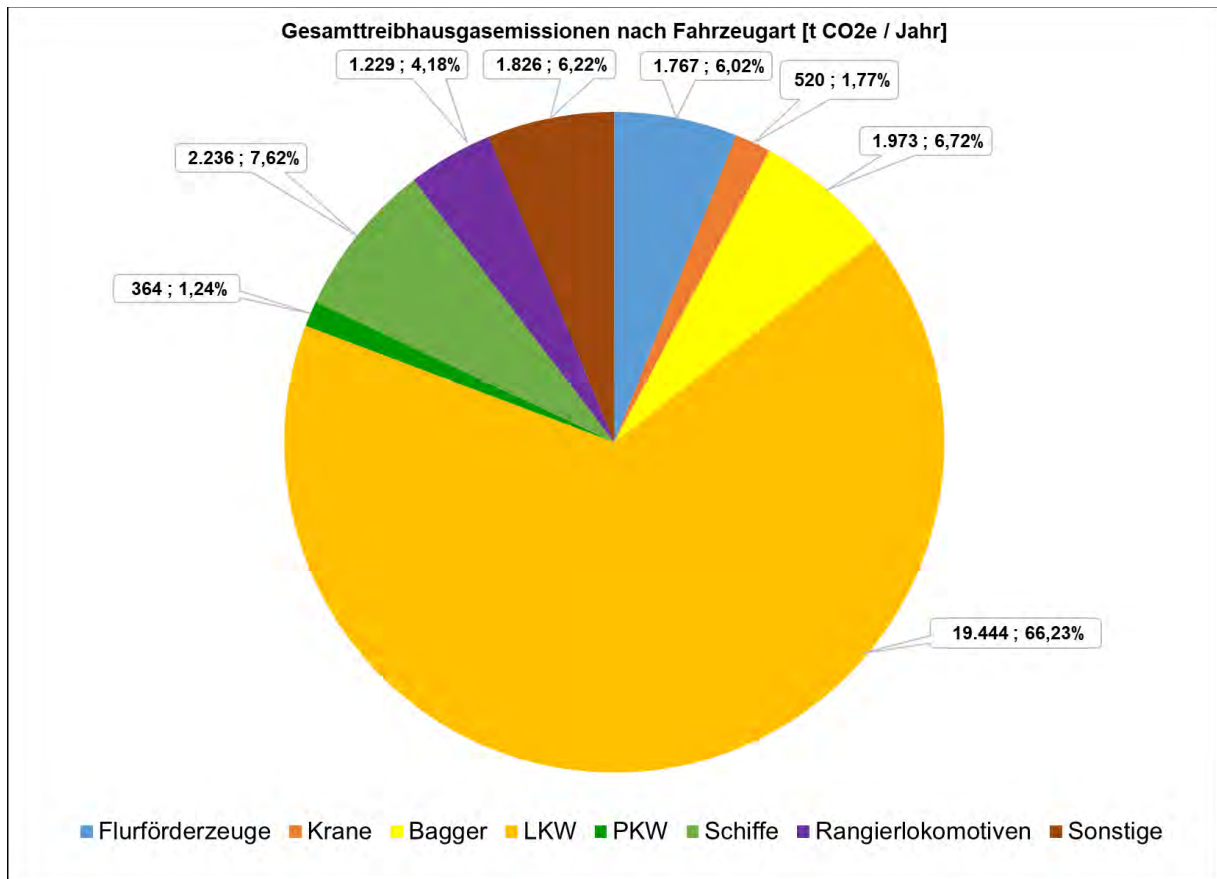


Abbildung 28: Aufteilung der Gesamttreibhausgasemissionen in Höhe von 29.359,65 t CO₂e auf die verschiedenen Fahrzeugtypen

Anhand von Abbildung 28 lässt sich erkennen, dass allein die LKW 66,23% an den gesamten Treibhausgasemissionen der untersuchten Prozesse in der Stadt Brake und dem Untersuchungsgebiet ausmachen. Die Umschlaggeräte, bestehend aus sonstigen Fahrzeugarten (6,22%), welche sich aus zwei Saughebern, einem Kanalspülgerät, sowie einer Kehrmaschine zusammensetzen, Baggern (6,72%), Flurförderfahrzeugen (6,02%), Rangierlokomotiven (4,18%) und Kranen (1,77%), sind insgesamt für 24,91% der Treibhausgasemission aller erhobenen Fahrzeuge verantwortlich. Gegensätzlich zu der hohen Fahrzeuganzahl der PKWs von 29% aller Fahrzeuge, verursachen diese nur 1,24% der jährlichen Treibhausgasemissionen. Diese Erkenntnis spricht erneut für die Sinnhaftigkeit der Fokussierung auf die Straßengüter- und Hafenlogistik in dem Projekt H2BrakeCO₂. Auch wenn der Hafen Brake als logistischer Dreh- und Angelpunkt dient und somit ein Schwerpunkt auf die wasserseitige Logistik assoziiert wird, geht aufgrund der ausschließlich selektiven Betrachtung der Schifffahrt und einer damit einhergehenden Ausklammerung der Fracht und Binnenschiffe hervor, dass das größte THG-Einsparpotential landseitig realisierbar ist.

Um die Emissionen der untersuchten Prozesse in einen bundesdeutschen Kontext zu setzen und damit den Beitrag des Projekts H2BrakeCO2 zum Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2045 zu verdeutlichen, kann die Gesamtemission des Verkehrssektors in Deutschland herangezogen und in Relation zu den hier ermittelten Werten werden gesetzt werden. 2020 emittierte der Verkehrssektor laut Klimabilanz des Umweltbundesamtes 146 Millionen Tonnen CO₂.⁶⁷ Bei einer Bevölkerungsanzahl 83,02 Mio. Einwohner ergibt sich hieraus eine Pro-Kopf-Emission von 1,759 t. Übertragen auf die Stadt Brake (Unterweser) mit einer Bevölkerungsanzahl von 14.824 (Stand 12/2020) entfällt auf sie damit eine theoretische anteilige Treibhausgasemission im Verkehrssektor von 26.069,67 t CO₂e im Jahr 2020.

Im Jahr 2019 emittierten die im Rahmen der methodenbasierten Aufnahme erhobenen Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet eine Treibhausgasemission von 29.359,65 t CO₂e. Damit würde die Substitution der erhobenen Fahrzeuge durch CO₂-neutrale Alternativen die auf die Stadt Brake entfallende einzusparende Menge an Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu 112,62 % decken, obwohl der Individual- und öffentliche Nahverkehr bei der Datenerhebung nicht berücksichtigt wurden und weitere Potentiale zur Einsparung von Treibhausgasemissionen bieten. Diese Aussage lässt die Annahme zu, dass die Stadt Brake ihr rechnerisches Treibhausgasbudget jährlich um mindestens 12,62% überschreitet. Jedoch muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass nicht sämtliche durch die in diesem Konzept erhobenen Fahrzeuge emittierten Emissionen im Braker Stadtgebiet anfallen. Ferner sind nicht alle in diesem Konzept berücksichtigten Unternehmen direkt im Braker Stadtgebiet niedergelassen. Die vorausgegangene Gegenüberstellung diente ausschließlich zur Veranschaulichung des Ausmaßes der einsparbaren Treibhausgasemissionen.

4.3.6 Mögliche Wasserstoffanwendungen in der Transportwirtschaft

Dem Bereich der Transportwirtschaft lassen sich aus den erhobenen Daten die Fahrzeugtypen LKW und PKW zuordnen. Somit steht der Straßengüterverkehr im Vergleich zu dem Transportweg über Schiene-, Wasser- oder Luft im Fokus. Eine Ausnahme bildet die Fähre „Kleinensiel“, welche ebenfalls einen Teil des genutzten Streckennetzes der befragten Unternehmen darstellt und somit zur Überfahrt zwischen Brake und Sandstedt dient. Diese eignet sich somit im Bereich der Transportwirtschaft als mögliche Wasserstoffanwendung. Jedoch steht in der Schifffahrt nicht der Wasserstoff als Treibstoff im Fokus, sondern seine Nutzung als Zwischenmedium für die Weiterverarbeitung zu dem Brennstoff Methanol. Für den Einsatz von Brennstoffzellentechnologie in Transportsektor bieten sich sowohl PKWs als auch

⁶⁷ (50)

LKWs als mögliche Wasserstoffanwendungen an. Auf Seiten der PKWs wird zwischen Dienst-Betriebs- und Poolfahrzeuge differenziert. Außerdem wurde bei der Datenerhebung zwischen einem hafeninternen und -externen Einsatz unterschieden. Zusätzlich spielt die Antriebstechnologie der Fahrzeuge eine ausschlaggebende Rolle. Für eine Wasserstoffanwendung eignen sich in erster Linie solche Fahrzeuge, welche herkömmlich mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Daraus ergibt sich für das Projekt H2BrakreCO2 in Bezug auf den Transportsektor eine mögliche Wasserstoffanwendung für 152 LKWs und einen PKW, der als Betriebsfahrzeug mit Diesel betrieben wird. Vier der 152 LKWs im Transportsektor werden bereits mit LNG angetrieben. Zwar ist der Einsatz von LNG als Kraftstoff in der Logistik ein probates Mittel um Treibhausgasemissionen einzusparen. Jedoch fallen auch bei der Verbrennung von LNG weiterhin Treibhausgasemissionen an, sodass diese Dieselalternative lediglich als Zwischenlösung auf dem Weg zu einer Klimaneutralität angesehen werden muss. Daher fließt auch die Emission dieser Fahrzeuge in das THG-Einsparpotential durch Wasserstoffanwendung ein. Somit ergibt sich für die von dem projektbezogenen Untersuchungsgebiet ausgehende Transportwirtschaft ein durch Wasserstoffanwendungen realisierbares THG-Einsparpotential von **20209,55 t CO₂e**.

Jedoch ist anzumerken, dass bis auf zwei Ausnahmen (siehe Tabelle 16) im Untersuchungsgebiet ausschließlich LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40t betrieben werden. Die beiden Ausnahmen werden auf Grund ihres Einsatzzwecks innerhalb des Hafengeländes zu dem Betrieb der Hafenanlagen gezählt. Für LKWs mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 40t wird von dem Markt, Stand Juli 2021, noch keine CO₂-neutrale Alternative in Form eines Brennstoffzellen-LKWs angeboten. Somit ist diesbezüglich eine enge Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Betreiber notwendig, um dem gewünschten Einsatzzweck durch eine wasserstoffbasierte Transportlösung gerecht zu werden. Gegebenenfalls lassen sich mit den Logistikunternehmen jedoch auch Austauschpotentiale abhängig von den Anwendungspotentialen identifizieren, die auch den Einsatz kleinerer Lkw als Ersatz für 40-Tonner erlauben und somit zumindest in größeren Umfang Testszenarien auf Basis verfügbarer oder bereits avisierter H2-Truck-Modelle in naher Zukunft durchzuführen.

4.3.7 Mögliche Wasserstoffanwendungen im Betrieb der Hafenanlagen

Um den Hafenbetrieb aufrecht zu erhalten bedarf es unterschiedlichster Fahrzeuge und Umschlaggeräte, die die hafeninternen Prozesse ermöglichen und an hafenexterne Vorgänge anknüpfen. Durch die methodenbasierte Aufnahme konnten für den Betrieb der Hafenanlagen als mögliche Wasserstoffanwendung Flurförderfahrzeuge, Reinigungsmaschinen, Rangierlokomotiven, Arbeitsschiffe, Bagger, Krane, Saugheber sowie LKWs und PKWs

identifiziert werden. Im Bereich des Hafenbetriebs ergeben sich zwei LKWs mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 7,5 t und 7,5 bis 12 t als mögliche Wasserstoffanwendung. Bezüglich der Fahrzeugtypen, die unter die Kategorie PKW fallen, wurden fünf Poolfahrzeuge und 52 Betriebsfahrzeuge als geeignet definiert. Auch hier werden die Dienst-PKW differenziert betrachtet, da sie nicht direkt an dem Erhalt des Hafenbetriebs beteiligt sind und der Einsatzzweck aus der Unternehmensbefragung nicht klar ersichtlich wurde. Außerdem werden Fahrzeuge mit Batterie-Betrieb als mögliche Wasserstoffanwendung außen vorgelassen. Darunter fällt auch die strombedingte indirekte THG-Emission der Saugheber, welche durch den anzustrebenden Umstieg auf grünen Strom künftig entfallen wird. Zusätzlich konnten unter der Kategorie Flurförderfahrzeuge insgesamt 39 Gabelstapler, zwischen drei und 28 Tonnen Traglast, sowie neun Zugmaschinen und sieben Reachstacker identifiziert werden. Zwei Stapler mit einer Traglast von vier Tonnen werden bereits elektrisch betrieben und entsprechen in dem Verständnis des Projektes H2BrakeCO2 somit nicht dem durch Wasserstoff einzusparenden CO₂-Potential. Des Weiteren bieten die vier Mobilkrane, neun Raupen, 13 Radlader, ein Bobcat und zwei Bagger eine Möglichkeit zur Wasserstoffanwendung. Eine weitere mögliche Wasserstoffanwendung wird durch die eingesetzten Reinigungsmaschinen dargestellt, die sich aus dem ebenfalls mit Diesel betriebenen Kanalspülgerät und einer Kehrmaschine zusammensetzen. Die bereits unter der Kategorie „Sonstige“ erwähnten Saugheber werden über einen Stromanschluss betrieben und weisen somit keine Relevanz für eine mögliche Wasserstoffanwendung auf. Außerdem tragen drei Rangierlokomotiven zu der Aufrechterhaltung des Hafenbetriebs bei. Durch ihren hohen Treibstoffverbrauch pro Fahrzeug von 130.000 l Diesel pro Jahr wird hier ein hohes THG-Einsparpotential durch die mögliche Anwendung eines Wasserstoffbetriebes aufgezeigt.

4.3.8 Mögliche Wasserstoffanwendungen im Schifffahrtsbereich

Eine weitere mögliche Wasserstoffanwendung wird durch die Schifffahrt dargestellt, Wie bereits unter 4.3.3 erwähnt wurde, konzentrierte sich die methodenbasierte Aufnahme auf die Prozesse innerhalb des Untersuchungsgebietes und unternehmensbezogene Anwendungen der vor Ort ansässigen Logistikunternehmen. Somit wird das wasserseitige THG-Einsparpotential allein durch die für den Erhalt des Hafenbetriebes notwendigen Arbeitsschiffe dargestellt. Die ebenfalls innerhalb des Sektors Schifffahrt betrachteten Fähren „Guntsiet“ und „Kleinensiel“ werden als mögliche Wasserstoffanwendung im Bereich Hafenbetrieb nicht betrachtet. Die Fähre „Kleinensiel“ wird bereits als Teil der von dem Hafen Brake ausgehenden Transportstrecken zu dem Sektor Transportwirtschaft gerechnet und die Personen- und Fahrradfähre „Guntsiet“ wird im Rahmen des Kapitels 5.5 bezüglich des Anwendungsfall

Mobilität thematisiert. Die betrachteten Arbeitsschiffe setzen sich aus drei Peilbooten, einem Tonnenleger, jeweils zwei Versorgungs- und Ufersicherungsschiffen, sowie einem Gewässerkundeboot, zehn Schleppern und zwei Bunkerschiffen zusammen.

Der Einsatz von nachhaltigem Treibstoff in der Seeschifffahrt ist immer mehr gefordert und notwendig. Jedoch unterliegen die Schifffahrt und die Häfen einem globalen Konkurrenzkampf, in dem Alleingänge auf nationaler Ebene hinsichtlich der Bestimmungen zum Aufenthalt im Hafen geschäftsschädigend sind und zum Abwandern ganzer Linienverkehre führen können. Daher sollten Bestimmungen zur nachhaltigeren Ausrichtung der Schifffahrt stets auf globaler Ebene über die International Maritime Organisation (IMO) erlassen werden. Beispielhaft ist die IMO 2020 zu nennen, durch die der zulässige Schwefelanteil in der Treibstoffmasse für die Schifffahrt global von 3,5% auf 0,5% herabgesenkt wurde. Somit sind hochwertigere Treibstoffe und Alternativen zu den herkömmlichen Kraftstoffen gefordert. Wasserstoff könnte eine dieser Alternativen darstellen. Aktuell liegt der Fokus jedoch auf dem Einsatz von Schiffen mit Methanolantrieb. Diesbezüglich agiert Wasserstoff als Zwischenmedium in der Produktionskette von Methanol. Der Einsatz von Methanol in der Schifffahrt wird unter 5.6 genauer betrachtet.

Die durch die Schifffahrt emittierte THG-Emission lässt sich auf Grund der geplanten Anwendung von Methanol nicht als 100%-iges Einsparpotential darstellen. Diesbezüglich wurde der jährliche Kraftstoffverbrauch in Litern Marine Diesel mit dem entsprechenden THG-Faktor von Methanol, hergestellt aus Erneuerbaren Energien, von durchschnittlich 3,88 gCO₂e/MJ mit dem Heizwert von Methanol von 15,8 MJ/l multipliziert und zusätzlich mit einem Faktor von 2,5 versehen. Dieser soll das Verhältnis der benötigten Menge an Methanol gegenüber Marine Diesel realisieren. Um letztendlich das durch den Einsatz von auf grünem Wasserstoff basierenden Methanol mögliche THG-Einsparpotential zu erlangen, wurde die errechnete THG-Emission von Methanol von der THG-Emission des Ist-Zustandes abgezogen. Perspektivisch kann Methanol als CO₂-neutral angesehen werden, sobald sich Flächendeckend das Vorgehen durchgesetzt hat, das zur Herstellung benötigte CO₂ der Atmosphäre zu entnehmen.

Insgesamt entfällt auf die Hafenbetriebe unter Berücksichtigung der außer Acht zu lassenden elektrisch betriebenen Saughebern und weiterer elektrisch betriebener Fahrzeuge eine Gesamtemission von **6.960,13 t CO₂e**. Zusammen mit den Emissionen aus der Transportwirtschaft resultiert eine durch Wasserstoffanwendungen realisierbare THG-Einsparung von **27.196,68 t CO₂e**.

4.3.9 Priorisierung der Wasserstoffanwendungsfälle

Bei der Priorisierung der Wasserstoffanwendungsfälle liegt der Fokus in erster Linie auf dem THG Einsparpotential pro Fahrzeug in Kombination mit der identifizierten Anzahl des Fahrzeugtyps im Untersuchungsgebiet. Weitere Faktoren für eine Priorisierung sind durch die Marktreife und der Verfügbarkeit der Fahrzeuge gegeben. Die Priorisierung der Wasserstoffanwendungsfälle im vorliegenden Konzept ist Tabelle 17 zu entnehmen und soll im Folgenden näher erläutert werden.

Tabelle 17: Anzahl und Gesamtemission [t CO₂e] der für eine Umstellung geeigneter Fahrzeuge

Fahrzeugart	Priorität	Anzahl	Gesamt THG/a [t CO₂e]	THG/a und Stück [t CO₂e]
LKW	1	154	19444,44	126,26
Flurförderfahrzeuge	2	55	1765,43	32,10
Arbeitsschiffe	3	23	2112,73	91,86
Rangierlokomotiven	4	3	1228,50	409,50
Bagger	5	25	1973,08	78,92
Reinigungsmaschinen	6	2	21,39	10,70
PKW	7	62	103,82	1,67
Krane	8	4	520,28	130,07
Summe		324	26831,49	Ø 82,81

Abbildung 29 zeigt die Höhe der THG-Emissionen in tCO₂e pro Jahr für ein Fahrzeug der jeweiligen Gruppierung auf. Für die Darstellung wurden die Treibhausgasemissionen pro Fahrzeugsektor über die Gesamtanzahl des jeweiligen Fahrzeugtypen gemittelt und aufsteigend angeordnet. Die Fahrzeuge, die aufgrund der in 4.3.6 und 4.3.7 behandelten Argumente vorerst nicht als mögliche Wasserstoffanwendungsfälle gewertet werden, wurden bei dieser Gegenüberstellung ausgenommen. Um die Erkenntnisse aus Abbildung 29 korrekt zu interpretieren, wurden in Abbildung 30 zudem die Gesamtemissionen, die je Fahrzeugart pro Jahr anfallen aufsteigend angeordnet.

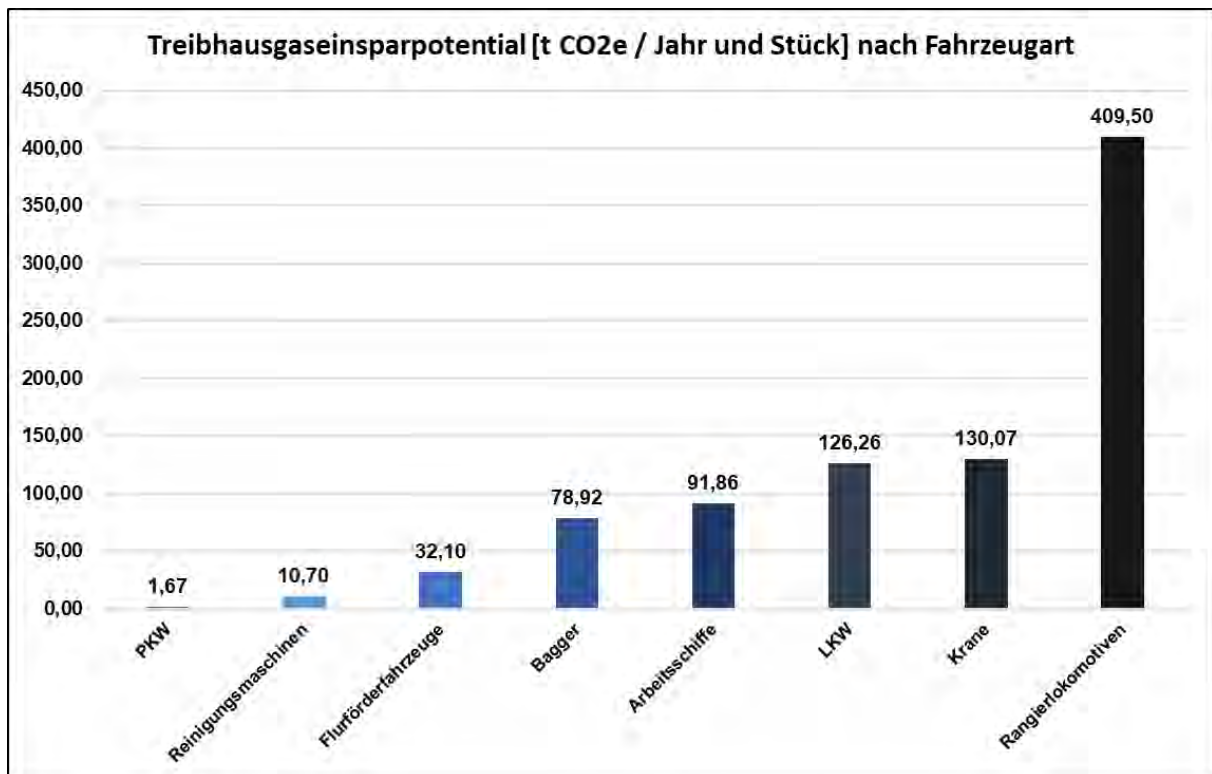


Abbildung 29: Vergleich des Treibhausgaseinsparpotentials [t CO₂e / Jahr und Stück] nach Fahrzeugart

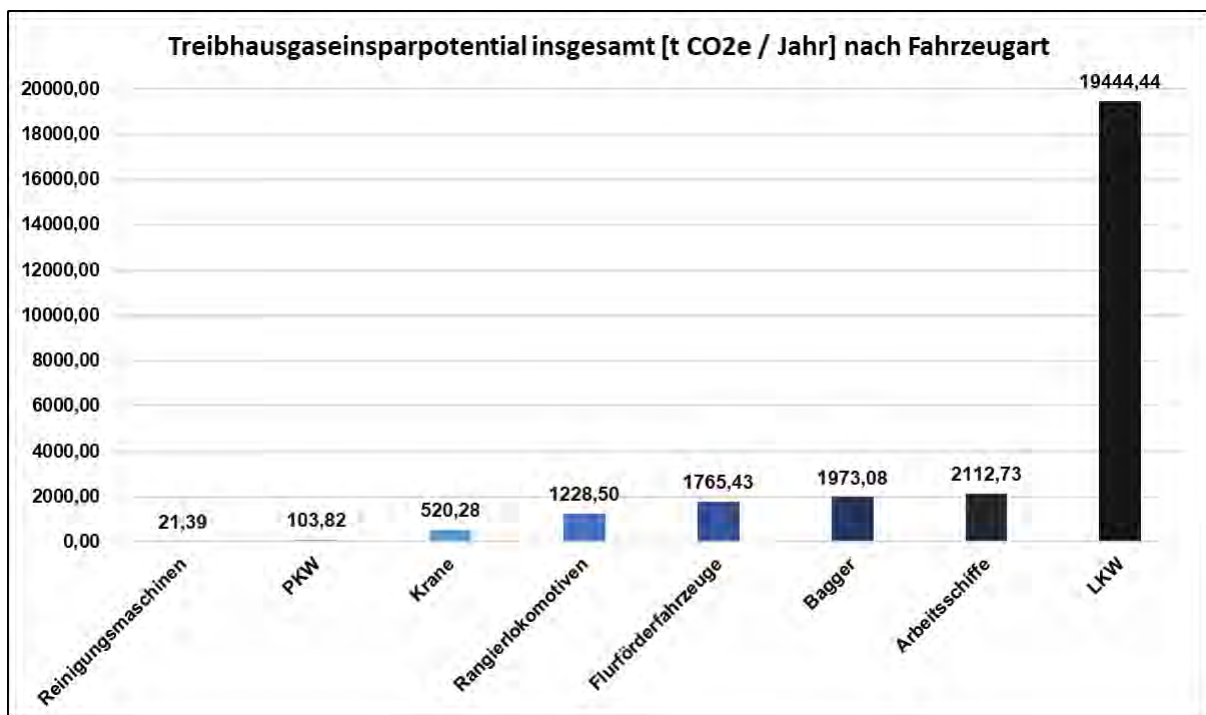


Abbildung 30: Vergleich des Treibhausgaseinsparpotentials insgesamt [t CO₂e / Jahr] nach Fahrzeugart

Offensichtlich zu erkennen ist die Höhe des THG-Einsparpotentials für eine Rangierlokomotive mit 409,5 t CO₂e pro Fahrzeug. Jedoch werden im Braker Hafen nur drei Rangierlokomotiven eingesetzt. Daher liegt hier relativ zu der Gesamtemission der erhobenen Fahrzeuge ein vergleichsweise niedriges THG-Einsparpotential vor. Gleiches gilt für die im Hafen eingesetzten Krane. Daher sind die LKW mit einem THG-Einsparpotential von 126,26 tCO₂e pro Fahrzeug und einem hohen Anteil an der Gesamtsumme der erhobenen Fahrzeuge mit der höchsten Priorität für einen Einsatz der Wasserstofftechnologie zu versehen. Diese wird sowohl durch die verhältnismäßig hohe THG-Emission von insgesamt 19.444,44 tCO₂e, als auch durch die Größe der im Untersuchungsgebiet eingesetzten LKW-Flotte untermauert. Bei der Fahrzeugkategorie „Schiffe“ und „Bagger“ konnten jährliche THG-Emissionen pro Fahrzeug von 91,86 und 78,92 tCO₂e ermittelt werden. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Personen- und Fahrzeugfähre „Kleinsiel“ mit 742,88 tCO₂e/a maßgeblich zu den in der Schifffahrt einsparbaren Emissionen von 2.112,73 tCO₂e/a beiträgt und somit ein hohes Einsparpotential pro einzelnes Fahrzeug aufweist. Auch wenn die Bagger pro Fahrzeug ein nahezu doppeltes THG-Einsparpotential gegenüber den Flurförderfahrzeugen aufweisen, ist in der Gesamtemission dieser Unterschied nicht zu erkennen. Zudem ist im Bereich der Flurförderfahrzeuge die Herstellung sowie der Umbau auf Brennstoffzellentechnologie bereits Stand der Technik, wohingegen für Bagger Spezialanfertigungen notwendig wären. Somit werden mit den LKWs und den Rangierlokomotiven, sowie der Fähre „Kleinsiel“ die Flurförderfahrzeuge vorerst priorisiert. Ein einzelnes der hier unter PKW zusammengefassten Pool- und Betriebsfahrzeugen ist im jährlichen Durchschnitt für nur 1,67 tCO₂e pro Fahrzeug verantwortlich. In der Summe zeigt die Fahrzeugkategorie PKW eine Gesamtemission von 103,82 tCO₂e pro Jahr auf. Diese Angabe fällt verhältnismäßig gering aus, obwohl eine Anzahl von 62 Fahrzeugen identifiziert werden konnte, die für die Umstellung auf eine treibhausgasneutrale Lösung in Frage kommen. Dennoch müssen auch PKW aufgrund ihrer insgesamt hohen Stückzahl im Verkehr zukünftig treibhausgasneutral betrieben werden. Welche Technologie sich im Bereich der PKW langfristig durchsetzen wird, kann noch nicht abschließend festgestellt werden. Zum Zeitpunkt der Konzepterstellung (2021) setzen sämtliche deutsche Automobilhersteller bei ihren im Fahrbetrieb treibhausgasneutralen PKW-Modellen auf batterieelektrische Antriebstechnologien ohne Brennstoffzelle. Diese Marktentwicklung lässt die Vermutung zu, dass wasserstoffbasierte Antriebslösungen im PKW-Bereich vorerst keine große Rolle spielen werden. Jedoch stellt mit einer steigenden Anzahl zugelassener batterieelektrischer PKW insbesondere deren Energieversorgung eine Herausforderung dar, die im PKW-Sektor zu einem Paradigmenwechsel führen und die Popularität brennstoffzellenbetriebener PKW sowohl bei den Herstellern als auch in der Bevölkerung positiv beeinflussen kann. Zudem ist für eine erfolgreiche Mobilitätswende die Gesamtzahl zugelassener PKW durch ein erweitertes alternatives Mobilitätsangebot im

öffentlichen Bereich sowie der Integration von Pool- und Carsharing Systemen zu reduzieren und zu optimieren.

4.4 Projektbeitrag zur weiteren Wasserstoffforschung

Durch das Projekt H2BrakeCO2 wurde eine gute Basis für weitere Wasserstoffforschung erarbeitet. Die Ermittlung der THG-Emissionen der Hafen- und Logistikprozesse innerhalb des Untersuchungsgebietes bietet eine vielfältige, nachhaltig angelegte Datengrundlage, die im Rahmen von Folgeprojekten genutzt und erweitert werden kann. Durch die Priorisierung von Wasserstoffanwendungsfällen, konnten sowohl Möglichkeiten, als auch Herausforderungen bei der Integration von Wasserstofftechnologie aufgezeigt werden. Somit bietet die Stadt Brake nicht nur das Potential zur Wasserstoffanwendung, sondern auch als Standort für weiterführende Wasserstoffforschung. Bei tatsächlicher Umsetzung des Konzeptes H2BrakeCO2 legt die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur den Grundstein für nachfolgende und angrenzende Wasserstoff bezogene Anwendungen. Durch die innerhalb H2BrakeCO2 erworbene Expertise besteht somit das notwendige Know-How und die Infrastruktur, um in Brake einen Forschungsstandpunkt für Wasserstofftechnologie zu etablieren. Die Hochschule Bremerhaven und die Jade-Hochschule Wilhelmshaven bieten sich diesbezüglich als entsprechende Partnerinstitutionen für die wissenschaftliche Zusammenarbeit und einen Austausch an. Die in Tabelle 15 aufgeführten Projekte H2BPMM, H2Cool und SH2UNTER der Hochschule Bremerhaven lassen sich in diesem Zusammenhang als ergänzende Forschungsprojekte identifizieren, die jetzt schon von dem Projekt H2BrakeCO2 direkt profitieren und Ansätze zum Beispiel in Zusammenhang mit der Emissionsberechnung übertragen wurden. Aktuell wird sich bei der Umstellung von fossilen Antriebsformen auf Wasserstofftechnologie zum größten Teil auf die Brennstoffzelle konzentriert, obwohl auch die Möglichkeit besteht herkömmliche Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff zu betreiben. Jedoch Bedarf es diesbezüglich weiterer Forschung, die den umweltfreundlicheren Umbau von Fahrzeugen gegenüber Neuanschaffungen attraktiver gestalten könnte. Der Mangel an geeigneten Motortestständen könnte durch Brake als Wasserstoffforschungsstandort behoben werden. Außerdem ergeben die aufgezeigten Anwendungsfälle ebenfalls das Potential bestehende Forschungslücken zu füllen. Die für den Hafenbetrieb eingesetzten Rangierlokomotiven eignen sich beispielsweise zur Anwendung von Pilotprojekten. Ein verwandtes Projekt für die Häfen Bremen und Hamburg mit dem Namen „SH2unter“ befindet sich aktuell in der 2. Stufe in der Beantragung beim BMVI und wird mit dem Kernpartner Alstom und unter Beteiligung des Smart Mobility Institute der Hochschule Bremerhaven voraussichtlich ab Mitte diesen Jahres durchgeführt.

Insgesamt ergibt sich auch ein großes Potential innerhalb einer „Smarten Logistik“ (s. Abbildung 31) die Verbindung klimaneutraler Antriebe mit der Digitalisierung zu vollziehen.

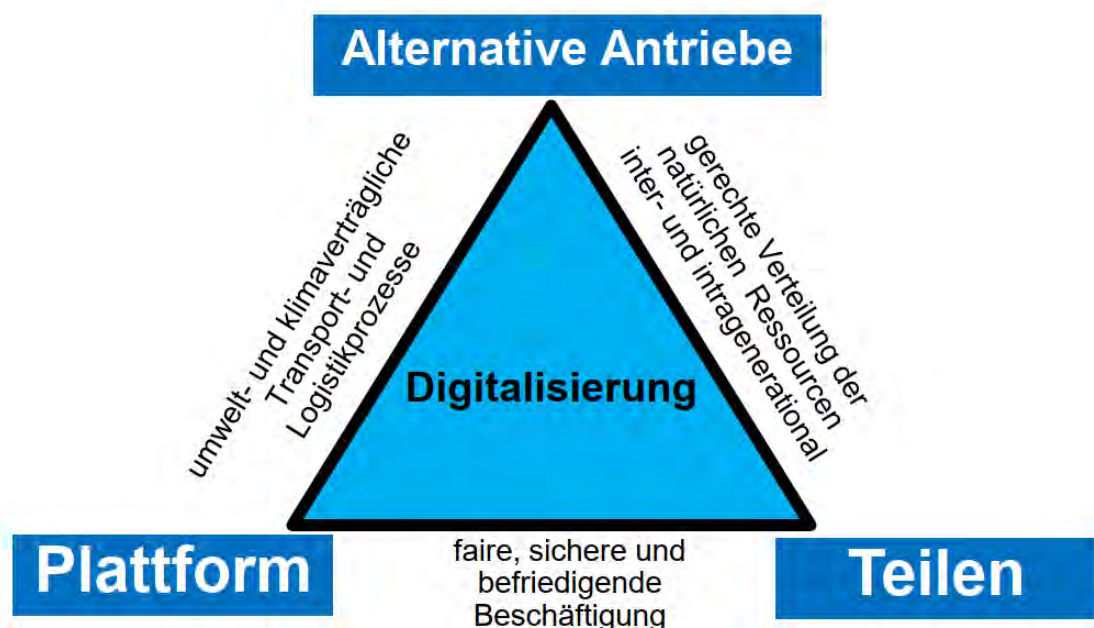


Abbildung 31: Smarte Logistik⁶⁸

„Eine Smarte Logistik adressiert die Neugestaltung der Logistik mit dem Ziel einer höheren Effizienz und Resilienz unter Berücksichtigung aller drei Perspektiven der Nachhaltigkeit: Ökologie, Soziales, Ökonomie. Dies umfasst die Umgestaltung zu umwelt- und klimaverträglichen Logistikprozessen, die Schaffung fairer, sicherer und befriedigender Beschäftigungsverhältnisse in einem langfristig stabilen ökonomischen System sowie die Berücksichtigung einer gerechten Ressourcenverteilung (inter- und intragenerational). Die Digitalisierung bildet hierfür den zentralen Enabler. Sie ist dabei kein Selbstzweck, sondern Mittel zum Zweck, eine Logistik, welche allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit gerecht wird, zu ermöglichen.“⁶⁹

Die Smarte Logistik ist das Forschungsframework des Smart Mobility Institutes für den Güterverkehr. Ein konkretes Projekt in diesem Rahmen ist das durch die Metropolregion Nordwest geförderte Projekt „H2BPMM – Wasserstofftechnologie Business Process Management“⁷⁰. In H2BPMM werden insbesondere die Genehmigungsverfahren für H2-Tankstellen zunächst untersucht, um in der Folge eine Standardisierung des Verfahrens als Basis für eine digitale Umsetzung bspw. zur Umsetzung innerhalb des E-Government zu

⁶⁸ (123)

⁶⁹ (123)

⁷⁰ (124)

erreichen. Innerhalb des Projekts wird neben den standardisierten Prozessen auch ein Minimum Viable Product (MVP) für eine digitale Umsetzung entwickelt.

Im Rahmen einer wasserstoffbasierten Logistik lassen sich zahlreiche andere Anwendungsfälle identifizieren, in denen durch Digitalisierung die Etablierung und Nutzung alternativer Antriebe befördert wird. Z.B. im Rahmen von Flottenmanagement- oder Tourenplanungssystemen, die die begrenzte Reichweite, begrenzte Tankmöglichkeiten etc. von H2-Fahrzeugen berücksichtigen und den Einsatz dahingehend optimieren. Ähnliche Systeme wurden durch Wissenschaftler des Smart Mobility Institutes bereits 2013 im Rahmen des Schaufensters Elektromobilität Niedersachsen für die E-Mobilität entwickelt⁷¹.

4.4.1 Förderung der Wasserstoffforschung durch Vergabe Wissenschaftlicher Arbeiten

Im Rahmen des Projektes H2BrakeCO2 wurde die Wasserstoffforschung bereits durch die Vergabe wissenschaftlicher Arbeiten gefördert. Diesbezüglich wurden Bachelor- und Masterarbeiten erstellt, welche sich mit einem breiten Spektrum an Forschungsfragen beschäftigten und inhaltlich in die Konzepterstellung eingeflossen sind. H2BrakeCO2 diente dabei auch als wesentliches Ökosystem bei der empirischen Datenerhebung für unterschiedlichste Fragestellungen.

Das Projekt hat somit auch einen direkten Beitrag zu der allgemeinen Forschung und der Ausbildung und Sensibilisierung von Studierenden hinsichtlich der Notwendigkeiten und den Möglichkeiten des Einsatzes CO₂-neutraler Transportsysteme insbesondere in den Studiengängen Transportwesen Logistik (TWL, B. Eng.) und Logistics Engineering Management (LEM, M. Sc.) geleistet. Folgende Arbeiten wurden im direkten Projektzusammenhang bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen:

Abschlussarbeiten im Bachelorstudiengang Transportwesen / Logistik zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Engineering (B. Eng.):

- „Einsatz von Wasserstofftechnologie im Straßengüterverkehr in einem begrenzten Streckennetz mit dem Praxisbezug zum Projekt H2BrakeCO2“, vorgelegt von Lara-Madeleine Gillert
- „Bedarfsermittlung für wasserstoff- und batteriebetriebene Antriebe für LKW ab 7,5 Tonnen Gesamtgewicht am Beispiel der Metropolregion Nordwest“, vorgelegt von Dominik Wefering

⁷¹ (125)

- Vergleich von Wasserstoff- und Elektrobatterieantrieben in betrieblichen PKW-Flotten am Beispiel des Projektes „H2BrakeCO2“, vorgelegt von David Anton Meyer

Abschlussarbeiten im Masterstudiengang Logistics Engineering Management zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (M. Sc.):

- „Konzeptionierung eines CO₂-freien landseitigen Hafenbetriebs auf Basis von Wasserstoff am Beispiel des Seehafens Brake“, vorgelegt von Marie Gloger
- „Konzeptionierung der Nutzung von grünem Methanol für den klein- und mittelgroßen Schiffsverkehr am Beispiel der Stadt Brake (Unterweser) für CO₂-freie Hafen- und Logistikprozesse“, vorgelegt von Anna-Maria Frei

5 Ausarbeitung der Wasserstoffanwendungsfälle

Auf Basis der erhobenen Daten, Informationen und Richtlinien sowie untersuchungsgebietsgebundener Einschränkungen werden im folgenden Abschnitt die Wasserstoffanwendungsfälle bezüglich ihres Wasserstoffbedarfs, möglicher THG-Emissionseinsparungen und bilanzierter Kosten rechnerisch und in Form von Umsetzungsplänen erarbeitet. Einen Ansatz für die Ermittlung der jährlich zu substituierenden Anzahl an Fahrzeugen bietet die Betrachtung der jährlich einzusparenden Menge an Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor und die Übertragung dieser Werte auf die Treibhausgasemission der erhobenen Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet.

In einem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts vom 29. April 2021 wurde die Bundesregierung aufgefordert Ihre Zielvorgaben zur Minderung der Treibhausgasemissionen zu verschärfen und bereits zum Jahr 2045 eine Klimaneutralität über alle Sektoren hinweg zu erreichen. Daraufhin hat der Bundestag am 24. Juni 2021 die Klimaschutznovelle beschlossen, aus der die neuen angepassten jährlichen Minderungsziele pro Sektor für die Jahre 2023 bis 2030 hervorgehen. Die Festlegung der jährlichen Minderungsziele pro Sektor in den Jahren 2031 bis 2040 ist für das Jahr 2024 geplant und bis spätestens 2032 ist die Festlegung der jährlichen Minderungsziele für die Jahre 2041 bis 2045 vorgesehen.⁷²

Für die Ausarbeitung der Umsetzungspläne der einzelnen Sektoren innerhalb des Projektes H2BrakeCO2 wurde sich stark an den Vorschlägen der Agora Energiewende zum Klimaschutzgesetz 2021 mit dem Stand Mai 2021 orientiert. Bei der geplanten Umsetzung der betrachteten Anwendungsfälle wird die Einsparung von THG-Emissionen nicht nur durch den Einsatz von Wasserstofftechnologie realisiert, sondern ebenfalls der Umstieg auf hundertprozentigen Ökostrom und die Einsparung von Emissionen durch effizientere Nutzung von Fahrzeugflotten bedacht. Abbildung 32 stellt die anzustrebende Entwicklung der Treibhausgasemissionen aller Sektoren bis zum Jahr 2050 in Deutschland dar und zeigt auf, dass zum Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 bereits eine Minderung der jährlichen Treibhausgasemissionen von 41% stattgefunden hat.

⁷² (48)

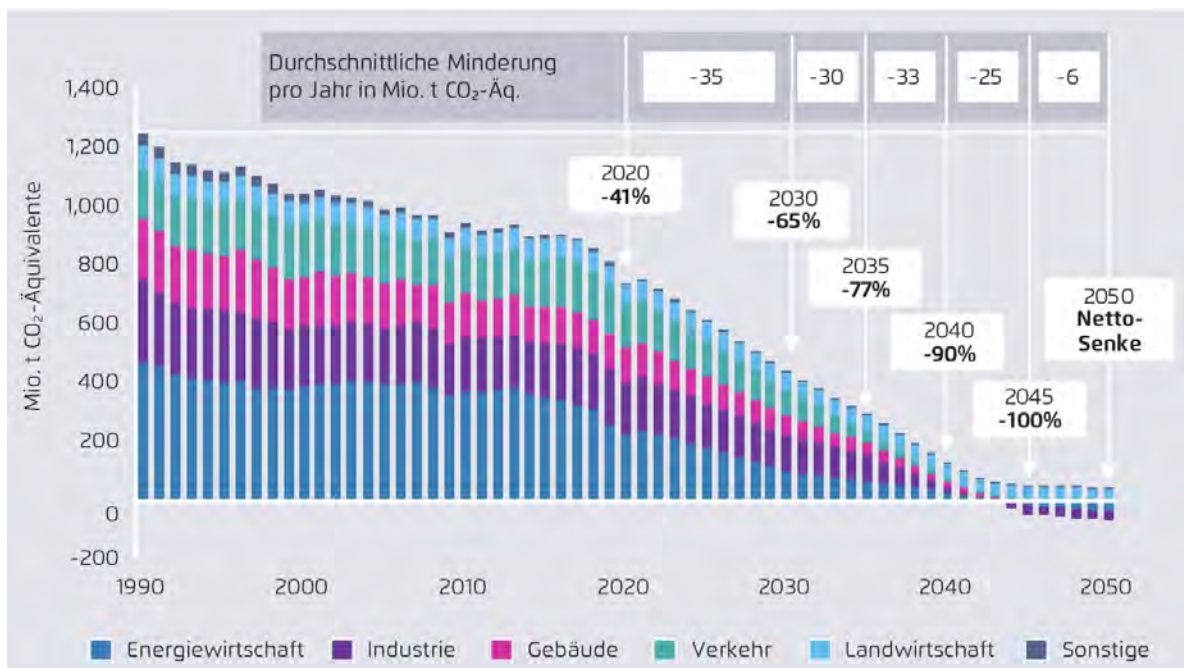


Abbildung 32: Vorschlag zur Umsetzung des BVerfG-Beschlusses und des neuen EU-Klimagesetzes der Agora Energiewende⁷³

Da sich die betrachteten Prozesse innerhalb des Untersuchungsgebietes dem Verkehrssektor zuordnen lassen, entspricht die Entwicklung der prozentualen THG-Einsparungen des Verkehrssektors in Deutschland den Anforderungen an die zeitlich gebundenen Einsparungsschritte des hier betrachteten Untersuchungsgebietes. In Tabelle 18 sind die auf den Verkehrssektor entfallenden Jahresemissionsmengen aufgeführt. Die Werte für die jährliche prozentuale Reduktion zwischen 2030 und 2045 wurden linear interpoliert, da die Bundesregierung den Zeitpunkt für die finale Festlegung der Minderungsziele erst für das Jahr 2024 vorgesehen hat. Für das Jahr 2045 wird von einer hundertprozentigen bilanziellen Klimaneutralität ausgegangen.

Tabelle 18: Zugelassene Jahresemissionsmengen für den Verkehrssektor nach Vorschlag für Klimaschutzgesetz 2021

In Mio. t CO ₂ e	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040	2045
Verkehr	145	139	133	126	120	114	108	102	95	89	40	11	0
Reduktion ggü. Vorjahr [%]		4,14	4,32	5,26	4,76	5,00	5,26	5,56	6,86	6,32			
Reduktion ggü. 1990										65%	77%	90%	100%

⁷³ (49)

Tabelle 19: Jährliche anzustrebende Entwicklung der Treibhausgasemissionen [t CO₂e] gemäß Agora Energiewende zum Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2045

Jahr	Gesamt-emission	LKW	Bagger	Flurförder-fahrzeuge	Rangier-lokomotiven	Krane	PKW	Reinigungs-maschinen	Schiffe	Abnahme zum Vorjahr [%]
2021	27.170	19.444	1.973	1.765	1.229	520	104	21	2.113	
2022	26.045	18.640	1.891	1.692	1.178	499	100	21	2.025	4,14%
2023	24.921	17.835	1.810	1.619	1.127	477	95	20	1.938	4,32%
2024	23.610	16.897	1.715	1.534	1.068	452	90	19	1.836	5,26%
2025	22.485	16.092	1.633	1.461	1.017	431	86	18	1.748	4,76%
2026	21.361	15.287	1.551	1.388	966	409	82	17	1.661	5,00%
2027	20.237	14.483	1.470	1.315	915	388	77	16	1.574	5,26%
2028	19.112	13.678	1.388	1.242	864	366	73	15	1.486	5,56%
2029	17.801	12.739	1.293	1.157	805	341	68	14	1.384	6,86%
2030	16.677	11.935	1.211	1.084	754	319	64	13	1.297	6,32%
2031	14.840	10.621	1.078	964	671	284	57	12	1.154	11,01%
2032	13.004	9.307	944	845	588	249	50	10	1.011	12,37%
2033	11.168	7.992	811	726	505	214	43	9	868	14,12%
2034	9.331	6.678	678	606	422	179	36	7	726	16,44%
2035	7.495	5.364	544	487	339	144	29	6	583	19,68%
2036	6.408	4.586	465	416	290	123	24	5	498	14,50%
2037	5.322	3.808	386	346	241	102	20	4	414	16,96%
2038	4.235	3.031	308	275	191	81	16	3	329	20,42%
2039	3.148	2.253	229	205	142	60	12	2	245	25,66%
2040	2.061	1.475	150	134	93	39	8	2	160	34,52%
2041	1.649	1.180	120	107	75	32	6	1	128	20,00%
2042	1.237	885	90	80	56	24	5	1	96	25,00%
2043	824	590	60	54	37	16	3	1	64	33,33%
2044	412	295	30	27	19	8	2	0	32	50,00%
2045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100,00%

In Tabelle 19 ist der Verlauf der notwendigen Reduktion der Jahresemissionen des Untersuchungsgebietes H2BrakeCO₂ für das Erreichen der Klimaneutralität in 2045 aufgezeigt. Diesbezüglich wurden die von H2BrakeCO₂ erhobenen THG-Emissionen unter der Annahme, dass der Jahresausstoß an CO₂e im Jahr 2021 dem Ausstoß aus dem

Betrachtungszeitraum 2019 gleicht, auf die Entwicklung der THG-Emissionen des deutschen Verkehrssektors übertragen.

Tabelle 20: Kumulierte einzusparende Menge an Treibhausgasemissionen [t CO₂e] bis zu dem jeweiligen Jahr

Jahr	Gesamt-emission	LKW	Bagger	Flurförderfahrzeuge	Rangier-lokomotiven	Krane	PKW	Reinigungs-maschinen	Schiffe
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	1.124	805	82	73	51	22	4	1	87
2023	2.249	1.609	163	146	102	43	9	2	175
2024	3.560	2.548	259	231	161	68	14	3	277
2025	4.684	3.352	340	304	212	90	18	4	364
2026	5.809	4.157	422	377	263	111	22	5	452
2027	6.933	4.962	503	450	313	133	26	5	539
2028	8.057	5.766	585	524	364	154	31	6	627
2029	9.369	6.705	680	609	424	179	36	7	729
2030	10.493	7.510	762	682	474	201	40	8	816
2031	12.329	8.824	895	801	557	236	47	10	959
2032	14.166	10.138	1.029	920	641	271	54	11	1.102
2033	16.002	11.452	1.162	1.040	724	306	61	13	1.244
2034	17.838	12.766	1.295	1.159	807	342	68	14	1.387
2035	19.675	14.080	1.429	1.278	890	377	75	15	1.530
2036	20.761	14.858	1.508	1.349	939	398	79	16	1.614
2037	21.848	15.636	1.587	1.420	988	418	83	17	1.699
2038	22.935	16.414	1.666	1.490	1.037	439	88	18	1.783
2039	24.022	17.192	1.744	1.561	1.086	460	92	19	1.868
2040	25.109	17.969	1.823	1.632	1.135	481	96	20	1.952
2041	25.521	18.264	1.853	1.658	1.154	489	98	20	1.985
2042	25.933	18.559	1.883	1.685	1.173	497	99	20	2.017
2043	26.345	18.854	1.913	1.712	1.191	504	101	21	2.049
2044	26.757	19.149	1.943	1.739	1.210	512	102	21	2.081
2045	27.170	19.444	1.973	1.765	1.229	520	104	21	2.113

In Tabelle 20 werden in Anlehnung an die anzustrebende Entwicklung der Treibhausgasemissionen die jährlichen kumulierten Treibhausgaseinsparziele für jede Fahrzeugart aufgelistet.

Tabelle 21: Kumulierte Anzahl der zu substituierenden Fahrzeuge je Fahrzeugart zum jeweiligen Jahr

Jahr	Gesamtanzahl	LKW	Bagger	Flurförder- fahrzeuge	Rangier- lokomotiven	Krane	PKW	Reinigungs- maschinen	Schiffe
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	18	8 (7)	2	3	0	0	3	1	1
2023	32	15 (13)	3	5	0	0	6	1	2
2024	48	22 (21)	4	8	1	0	9	1	4
2025	59	27	5	10	1	1	11	1	4
2026	73	33	6	12	1	1	14	1	5
2027	87	40	7	15	1	2	16	1	6
2028	100	46	8	17	1	2	19	1	7
2029	115	54	9	19	2	2	22	1	8
2030	128	60	10	22	2	2	24	1	9
2031	151	70	12	25	2	2	29	1	11
2032	174	81	14	29	2	3	33	2	12
2033	195	91	15	33	2	3	37	2	14
2034	217	102	17	37	2	3	41	2	16
2035	238	112	19	40	3	3	45	2	17
2036	253	118	20	43	3	4	48	2	18
2037	265	124	21	45	3	4	50	2	19
2038	278	130	22	47	3	4	53	2	20
2039	290	137	23	49	3	4	55	2	21
2040	303	143	24	51	3	4	58	2	22
2041	307	145	24	52	3	4	59	2	22
2042	312	147	24	53	3	4	60	2	22
2043	318	150	25	54	3	4	61	2	23
2044	322	152	25	55	3	4	62	2	23
2045	324	154	25	55	3	4	62	2	23

Tabelle 21 kumuliert gemäß den Erkenntnissen aus Tabelle 19 und Tabelle 20 die notwendigen Fahrzeugs substitutionen für jedes Jahr und jeden Fahrzeugtyp, die durchgeführt werden müssten, um die jährlichen Einsparziele erreichen zu können. Dabei wurden die jährlichen Einsparziele bis zum Jahr 2024 für die Rangierlokomotiven und die jährlichen Einsparziele bis zum Jahr 2025 für die Krane bewusst auf die LKW umgelegt, da bis zu diesen Jahren seitens der Ersteller dieses Konzepts nicht mit einer Marktreife von wasserstoffbetriebenen Fahrzeuglösungen dieser Typen gerechnet wird. In diese Annahme sind Gespräche mit den etablierten Herstellern von Wasserstofffahrzeugen sowie Branchenexperten eingeflossen. Die in der Tabelle 21 eingeklammerten Werte stellen die Anzahl an LKW dar, die ohne diese Umlegung hätten angeschafft werden müssen.

An Hand der aufgezeigten einzusparenden Mengen an THG-Emission kann nun erarbeitet werden, wie im Untersuchungsgebiet durch Einsatz von Wasserstofftechnologie diese Einsparungen erfolgen sollten. Sämtliche Überlegungen dieser Art wurden losgelöst von der Marktreife der einzusetzenden Fahrzeuge erarbeitet und stellen lediglich eine theoretische Ausführung dessen dar, welche Maßnahmen in welchem Tempo ergriffen werden müssten, um eine Klimaneutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Die praktische Durchführung dieses theoretischen Umsetzungsplans steht dabei vor unterschiedlichen Herausforderungen. Neben der bereits genannten Marktreife der notwendigen Brennstoffzellenfahrzeuge sind beispielsweise die starke Abhängigkeit von der Motivation der ortsansässigen Unternehmen, sowie von politischen Entscheidungen hinsichtlich der weiteren Förderung der Wasserstofftechnologien zu nennen.

In Abbildung 33 wird aufgezeigt, wie eine mögliche THG-Emissionseinsparung bezogen auf die jeweils betrachteten Fahrzeugtypen bis zur Klimaneutralität in 2045 durch die Integration von Wasserstofftechnologie in das Untersuchungsgebiet H2BrakeCO2 aussehen könnte. Hierdurch wird ersichtlich, dass die CO₂-Neutralität der betrachteten Fahrzeuge durch die Anwendung von Wasserstofftechnologie entsprechend den Einsparungsansprüchen der Agora Energiewende 2021 zu hundert Prozent umgesetzt werden kann. Dies bestärkt erneut das verhältnismäßig hohe Potential von Wasserstoff als Medium zur Einsparung von Treibhausgasemissionen gemäß Abbildung 1.

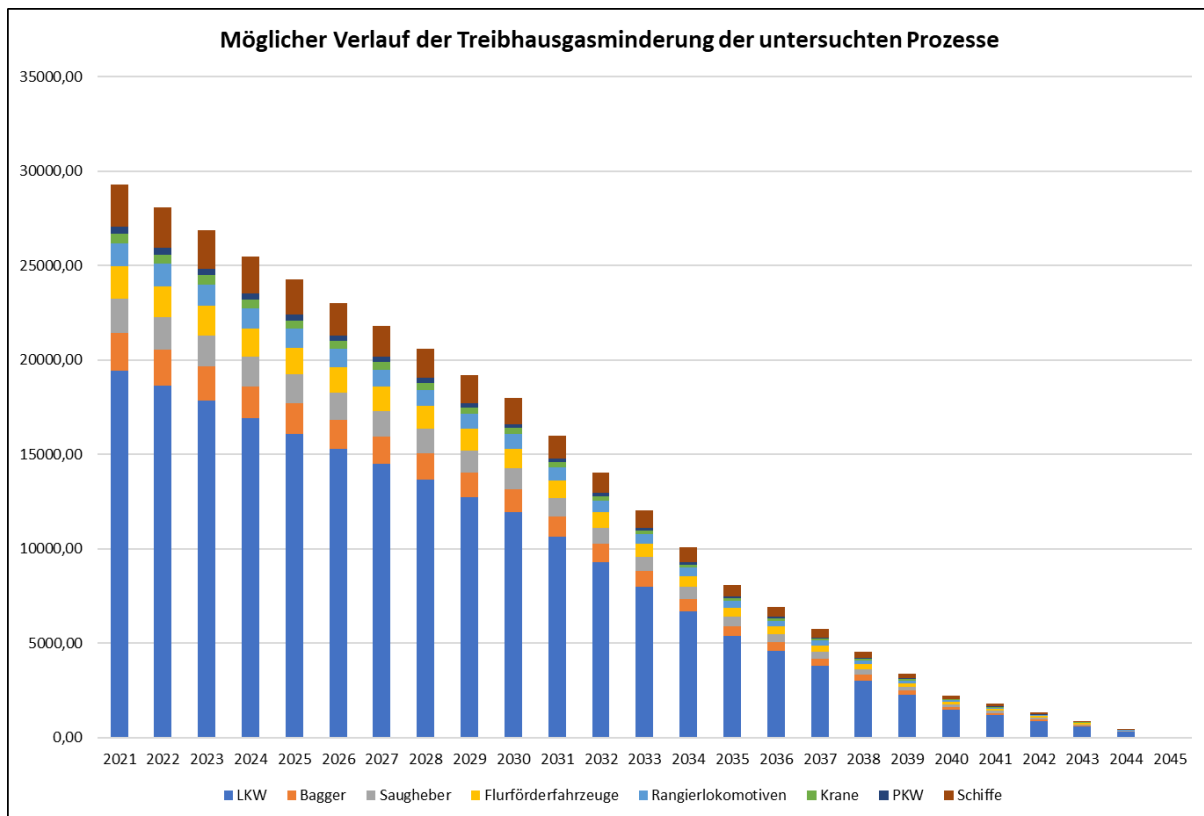


Abbildung 33: Umsetzung der Klimaziele 2021 durch die Einsparung von THG-Emissionen im Untersuchungsgebiet H2BrakeCO2 durch mögliche Wasserstoffanwendungen bezogen auf die jeweiligen Fahrzeugtypen

In den folgenden Unterkapiteln wird bezogen auf die jeweiligen Sektoren die Realisierung der Wasserstoffanwendungsfälle spezifischer aufgezeigt und bezüglich ihrer Priorisierung als THG-Einsparpotential, der Investitions- und Betriebskosten, sowie des Wasserstoffbedarfs diskutiert.

5.1 Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake

Für die an den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake beteiligten Fahrzeuge und Umschlaggeräte sollen im folgenden Abschnitt mögliche Wasserstofffahrzeuge in Betracht gezogen und hinsichtlich ihres Wasserstoffbedarfs, dem THG-Einsparpotential sowie den Investitions- und laufenden Kosten ausgearbeitet werden.

Zu den Fahrzeugen und Umschlaggeräten gehören:

- Flurförderfahrzeuge
- Bagger
- Rangierlokomotiven

- Krane
 - Reinigungsmaschinen
- und
- Saugheber

Wie bereits im Abschnitt 4.3.7 erläutert entfallen die strombedingten indirekten Emissionen der Saugheber, sobald ein Umstieg auf den Betrieb mit grünem Strom erfolgt. Daher werden die dadurch erzielbaren Treibhausgaseinsparungen auch nicht dem Einsatz der Wasserstofftechnologie zugeordnet.

5.1.1 Wasserstoffbedarf für die Umschlagprozesse im Hafen der Stadt Brake

Für die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs, der sich durch den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und Umschlaggeräten als Ersatz für die bestehenden Flottenfahrzeuge der Unternehmen einstellt, müssen zunächst die Anforderungen an die einzusetzenden wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge bekannt sein. Hierzu gehören:

- Die zurückgelegten Strecken beziehungsweise geleisteten Einsatzstunden
- und
- Die Traglasten beziehungsweise maximalen Zuladungen der bestehenden Fahrzeuge

Diese in der methodenbasierten Aufnahme erhobenen Daten werden für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen in Tabelle 22 bis Tabelle 26 dargestellt. Bei den zurückgelegten Strecken beziehungsweise geleisteten Einsatzstunden handelt sich um die Jahreswerte für das Jahr 2019 die zur Ermittlung der geleisteten täglichen Einsatzzeiten / Strecken durch 360 Tage geteilt wurden. Die Unternehmen im Hafen arbeiten bis auf wenige Ruhetage an 365 Tagen im Jahr. Abzüglich möglicher Ausfallzeiten aufgrund von Wartung und Reparaturarbeiten kann daher von 360 Arbeitstagen ausgegangen werden.

Tabelle 22: Mittlere Einsatzzeiten der Flurförderfahrzeuge im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug

Traglast	Anzahl	Leistung [kW]	Ø Einsatzzeit pro Jahr [h]	Ø Einsatzzeit pro Tag [h]
3 t	2		201,0	0,56
3,5 t	4		217,0	0,60
4 t	1		212,7	0,59
6 t	5		1219,2	3,39
7 t	1		113,0	0,31
12 t	17		1432,1	3,98
16 t	5		1419,0	3,94
25 t	3	ca. 200	1111,0	3,09
28 t	1	ca. 200	1499,0	4,16
Reachstacker [45 t]	7	ca. 270	609,4	1,69
Zugmaschine	9	ca. 150	285,8	0,79

Tabelle 23: Mittlere Einsatzzeiten der Bagger im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug

Baggerart	Anzahl	Typ	Leistung [kW]	Ø Einsatzzeit pro Jahr [h]	Ø Einsatzzeit pro Tag [h]
Bulldozer	9	D41	ca. 100	1167	3,24
Radlader	8	WA 500	ca. 270	1563	4,34
Radlader	1	WA 380	ca. 150	500	1,39
Radlader	4	WA 200	ca. 100	1500	4,17
Bobcat	1	Bobcat	ca. 50	150	0,42
Raupenbagger	2	R 914 C	ca. 110	2350	6,53

Tabelle 24: Mittlere Einsatzzeiten der Rangierlokomotiven im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug

Fahrzeugart	Anzahl	Ø Einsatzzeit pro Jahr [h]	Ø Einsatzzeit pro Tag [h]
Rangierlokomotive	3	780	2,17

Tabelle 25: Mittlere Einsatzzeiten der Krane im Hafen der Stadt Brake pro Gerätetyp

Typ	Anzahl	Leistung [kW]	Ø Einsatzzeit pro Jahr [h]	Ø Einsatzzeit pro Tag [h]
Liebherr Mobilkran LHM500	1	ca. 600	1330	3,69
Liebherr Mobilkran LHM550	1	ca. 750	1481	4,11
Liebherr Mobilkran LHM150M	1	ca. 400	1309	3,64
Mantisinen 100	1	ca. 400	525	1,46

Tabelle 26: Mittlere Strecke der Reinigungsmaschinen im Hafen der Stadt Brake pro Fahrzeug

Fahrzeugtyp	Anzahl	Ø Strecke pro Jahr [km]	Ø Strecke pro Tag [km]
Kanalspülgerät	1	2820,33	7,83
Kehrmaschine	1	5439,00	15,11

Mit den nun bekannten Anforderungen können Hersteller nach passenden Wasserstofffahrzeugen angefragt werden, um die durch eine Substitution bestehender Fahrzeuge aufkommenden Wasserstoffbedarfe sowie die Anschaffungs- und laufenden Kosten zu ermitteln. Die bis in die Schlussphase des Projekts andauernde Recherche

offenbarte aufgrund der überschaubaren Verfügbarkeit von wasserstoffbetriebenen Umschlaggeräten folgende passende Produkte:

Tabelle 27: Ergebnis der Untersuchung von am Markt verfügbaren wasserstoffbetriebenen Umschlaggeräten und Fahrzeugen

Fahrzeugart	Traglast	Hersteller ⁷⁴	H2-Tankkapazität	Brennstoffzellenleistung
Gabelstapler	3 t	Toyota		15 kW
Gabelstapler	6,5 t	Plug Power		20 kW
Gabelstapler	12 t	Kion, Volvo	6 kg	30 kW
Gabelstapler	16 t	Toyota, Kion,	7,5 kg	40 kW
Güterlokomotive		Reuschling		400 kW
Bagger		Volvo	20 - 40 kg	40 - 100 kW

Da aus den Gesprächen mit den Herstellern keine Informationen zu den Wasserstoffbedarfen der Fahrzeuge und Umschlaggeräte hervorgegangen sind, muss eine näherungsweise Abschätzung auf Basis des maximalen stündlichen Wasserstoffbedarfs in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung herangezogen werden. Dieser verhält sich nicht proportional zur Brennstoffzellenleistung und muss daher für jede Leistung gesondert ermittelt werden. In Tabelle 28 sind einige gängige Brennstoffzellenleistungen mit den zugehörigen stündlichen Verbräuchen aufgeführt.

Tabelle 28: Wasserstoffbedarfe unterschiedlicher Brennstoffzellenleistungen⁷⁵

Brennstoffzellenleistung [kW]	Wasserstoffverbrauch [l/min]	Wasserstoffverbrauch [kg/h]
5	84	0,423864
7,8	130	0,55
8,5	140	0,70644
10	150	0,7569
15	225	1,26
20	320	1,61472
30	500	2,523
40	670	3,38082
50	838	4,228548
64	1060	5,34876
100	1620	8,17452
110	1782	8,991972
150	2430	12,26178
200	3240	16,34904
270	4374	22,071204
400	6400	32,2944

Die Berechnung des maximalen stündlichen Wasserstoffbedarfs beruht auf folgender Formel:

$$\text{Wasserstoffverbrauch} \left[\frac{l}{min} \right] * 60 * 0,0000841 \frac{kg}{l \text{ Wasserstoff}} = \text{Wasserstoffverbrauch} \left[\frac{kg}{h} \right]$$

⁷⁴ (79), (80), (81), (82), (83)

⁷⁵ (85)

Tabelle 29: Maximaler stündlicher Wasserstoffbedarf der Fahrzeuge und Umschlaggeräte

Fahrzeugart	Traglast	Hersteller ⁷⁶	H2-Tankkapazität	Brennstoffzellenleistung	Maximaler stündlicher H2-Bedarf [kg]
Gabelstapler	3 t	Toyota		15 kW	1,26
Gabelstapler	6,5 t	Plug Power		20 kW	1,61472
Gabelstapler	12 t	Kion, Volvo	6 kg	30 kW	2,523
Gabelstapler	16 t	Toyota, Kion,	7,5 kg	40 kW	3,38082
Güterlokomotive		Reuschling		400 kW	32,2944
Bagger		Volvo	20 - 40 kg	40 - 100 kW	3,38082-8,17452

5.1.2 Flurförderfahrzeuge

Mit dem 6,5 Tonnen Gabelstapler von Plug Power können technisch gesehen sowohl der 6 Tonnen als auch der 7 Tonnen Gabelstapler ersetzt werden. Auf diese beiden Staplerklassen entfallen 6 Gabelstapler. Weitere 17 Stapler und damit die größte Teilmenge unter dieser Fahrzeugart entfallen auf die 12 Tonnen Gabelstapler.

Diese insgesamt 23 Gabelstapler hätten, sofern sie durch die in Tabelle 29 aufgeführten wasserstoffbetriebenen Gabelstapler ersetzt werden, gemäß der unten aufgeführten Berechnung einen täglichen Wasserstoffbedarf von 198,61 kg und einen jährlichen Wasserstoffbedarf von 71.498,22 kg.

Täglicher Wasserstoffbedarf 6,5 t Gabelstapler =

$$\frac{5 * 3,39 \frac{h}{d} * 1,61472 \frac{kg H2}{h} + 1 * 0,31 \frac{h}{d} * 1,61472 \frac{kg H2}{h}}{6} = 4,65 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf 12 t Gabelstapler =

$$3,98 \frac{h}{d} * 2,523 \frac{kg H2}{h} = 10,04 kg$$

Die Substitution dieser 23 Gabelstapler durch wasserstoffbetriebene Gabelstapler würde die Einhaltung des auf die Flurförderfahrzeuge entfallenden jährlichen Treibhausgaseinsparziels bis einschließlich 2030 ermöglichen.

Fünf weitere Gabelstapler mit einer Tragfähigkeit von 16 t könnten ebenfalls durch die in Tabelle 29 aufgeführte Fahrzeuglösung von Toyota beziehungsweise Kion ersetzt werden. Hier beträgt der tägliche Wasserstoffbedarf 11,8 kg.

⁷⁶ (53)

Täglicher Wasserstoffbedarf 16 t Gabelstapler =

$$3,49 \frac{h}{d} * 3,38082 \frac{kg H_2}{h} = 11,80 kg$$

Insgesamt sieben der im Hafen eingesetzten Gabelstapler haben eine maximale Traglast unter fünf Tonnen und könnten nach dem heutigen Stand der Technik durch batteriebetriebene Gabelstapler ersetzt werden.

Für die verbleibenden 20 Flurförderfahrzeuge mit einer Tragfähigkeit von 25 t bis 45 t einschließlich der neun Zugmaschinen kann zum Zeitpunkt der Konzepterstellung keine Aussage zu möglichen wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen gemacht werden, da herstellerseitig zum Zeitpunkt der Konzepterstellung keine marktreifen Produkte am Markt angeboten werden. Daher kann an dieser Stelle lediglich eine näherungsweise Abschätzung der potentiellen Wasserstoffbedarfe der wasserstoffbetriebenen Fahrzeugalternativen erfolgen, indem die Diesel-Motorenleistung der bestehenden Fahrzeuge (siehe Tabelle 22) in Kombination mit dem maximalen Wasserstoffbedarf einer Brennstoffzelle mit entsprechender Leistung (siehe Tabelle 28) herangezogen wird. Die auf diesem Weg ermittelten Wasserstoffbedarfe fallen verhältnismäßig hoch aus, da brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge üblicherweise zusätzlich zur Brennstoffzelle mit einer Pufferbatterie ausgestattet werden. Diese dient im Betrieb zum Abfangen der Leistungsspitzen, sodass die Brennstoffzelle in Ihrer Leistung herunterdimensioniert werden kann. In wieweit die notwendige Leistung der Brennstoffzelle in einem wasserstoffbetriebenen Fahrzeug im Vergleich zu einem dieselbetriebenen Fahrzeug mit gleicher Systemleistung unter Zuhilfenahme einer Pufferbatterie herunterdimensioniert werden kann, lässt sich in der Praxis über einen Faktor darstellen. Da dieser Faktor jedoch für jeden Fahrzeugtypen unterschiedlich ausfällt und zudem vom Einsatzort und der Einsatzintensität abhängig ist, kann kein allgemeingültiger Faktor für das Verhältnis aus Brennstoffzellenleistung und Systemleistung festgelegt und verwendet werden. Daher sind die in diesem Abschnitt ermittelten Wasserstoffverbräuche ausschließlich als näherungsweise Annahmen zu verstehen. Um die genauen Wasserstoffbedarfe und daraus abgeleitete Emissionen und Kosten der Fahrzeuge zu ermitteln, für die in den nachfolgenden Abschnitten mangels verfügbarer Produkte am Markt eine näherungsweise Ermittlung der Bedarfe erfolgen musste, bedarf es zukünftige tiefergehende Untersuchungen in Form von Prototypenentwicklungen auf Basis von Umrüstungen und Machbarkeitsstudien.

Täglicher Wasserstoffbedarf 25t Gabelstapler =

$$3,09 \frac{h}{d} * 16,34904 \frac{kg H_2}{h} = 50,52 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf 28t Gabelstapler =

$$4,16 \frac{h}{d} * 16,34904 \frac{kg H_2}{h} = 67,98 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf 45t Reachstacker =

$$1,69 \frac{h}{d} * 22,071204 \frac{kg H_2}{h} = 37,30 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Zugmaschine =

$$0,79 \frac{h}{d} * 12,26178 \frac{kg H_2}{h} = 9,69 kg$$

Basierend auf die zuvor ermittelten Wasserstoffbedarfe der am Markt verfügbaren Gabelstaplertypen in Kombination mit den näherungsweise ermittelten Wasserstoffverbräuchen der übrigen Gabelstapler lässt sich der durchschnittliche Wasserstoffbedarf eines im Braker Hafen eingesetzten Gabelstaplers mit nachfolgender Formel ermitteln:

Durchschnittlicher täglicher Wasserstoffbedarf Gabelstapler Braker Hafen

$$\begin{aligned} &= (6 [6,5 t Gabelstapler] * 4,65 kg + 17 [12 t Gabelstapler] * 10,04 kg \\ &+ 5 [16 t Gabelstapler] * 11,8 kg + 3 [25 t Gabelstapler] * 50,52 kg \\ &+ 1 [28 t Gabelstapler] * 67,98 kg + 7 [45 t Reachstacker] * 37,30 kg \\ &+ 9 [Zugmaschine] * 9,69 kg) / 48 Gabelstapler = 17,20 kg \end{aligned}$$

5.1.3 Bagger

Die im Hafen der Stadt Brake eingesetzten Bagger teilen sich auf neun Bulldozer, 13 Radlader, einen Bobcat und zwei Raupenbagger auf. Gemäß Tabelle 23 bewegt sich die Motorleistung in einem Bereich von 50 bis 270 kW.

Aufgrund der unterschiedlichen Motorleistungen und spezifischen Einsatzzwecke dieser Fahrzeuge kann das in Tabelle 29 aufgeführte Produkt von Volvo nicht pauschal als Ersatz für alle Bagger herangezogen werden. Ferner ist nicht näher bekannt, in welchen Bereichen das Produkt von Volvo eingesetzt werden kann. Daher wird für eine Abschätzung des Wasserstoffbedarf der Bagger dasselbe Vorgehen wie für die Gabelstapler angewendet und analog zu den in Tabelle 23 aufgeführten Dieselleistungen der Bagger der Wasserstoffbedarf einer gleichstarken Brennstoffzelle als Richtwert herangezogen. Es gelten auch hier die bereits

erläuterten anzunehmenden Abweichungen zu den tatsächlich zu erwartenden Wasserstoffbedarfen. Für die Bagger im Hafen ergeben sich folgende Wasserstoffbedarfe:

Täglicher Wasserstoffbedarf Bulldozer D41 =

$$3,24 \frac{h}{d} * 8,17452 \frac{kg H_2}{h} = 26,485 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Radlader WA 500 =

$$4,34 \frac{h}{d} * 22,071204 \frac{kg H_2}{h} = 95,79 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Radlader WA380 =

$$1,39 \frac{h}{d} * 12,26178 \frac{kg H_2}{h} = 17,04 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf WA200 =

$$4,17 \frac{h}{d} * 8,17452 \frac{kg H_2}{h} = 34,09 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Bobcat =

$$0,42 \frac{h}{d} * 4,228548 \frac{kg H_2}{h} = 1,776 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Raupenbagger R914C =

$$6,53 \frac{h}{d} * 8,991972 \frac{kg H_2}{h} = 58,72 kg$$

Der durchschnittliche tägliche Wasserstoffbedarf der Bagger im Hafen kann anhand nachfolgender Berechnung abgeschätzt werden:

Durchschnittlicher täglicher Wasserstoffbedarf Bagger Braker Hafen

$$\begin{aligned} &= (9 \text{ Bulldozer} * 26,485 kg + 8 \text{ Radlader WA500} * 95,79 kg \\ &+ 1 \text{ Radlader WA380} * 17,04 kg + 4 \text{ Radlader} * 34,09 kg + 1 \text{ Bobcat} \\ &* 1,776 kg + 2 \text{ Raupenbagger R914C} * 58,72 kg) / 25 \text{ Bagger} = 51,09 kg \end{aligned}$$

5.1.4 Rangierlokomotiven

Die Güterlokomotive des Herstellers Reuschling weist mit der Brennstoffzellenleistung von 400 kW einen stündlichen Wasserstoffbedarf von 32,2944 kg auf. Verrechnet mit der gemittelten

Einsatzzeit von 2,17 Stunden pro Rangierlokomotive und Tag ergibt sich ein täglicher Wasserstoffbedarf von 70,08 kg pro Rangierlokomotive.

$$\text{Täglicher Wasserstoffbedarf RL} = 2,17 \frac{h}{d} * 32,2944 \frac{kg H_2}{h} = 70,08 kg$$

5.1.5 Krane

Zu einer möglichen Wasserstoffanwendung für den Ersatz der im Hafen eingesetzten Mobilkrane sowie den damit einhergehenden Kosten kann zum Zeitpunkt der Konzepterstellung keine Aussage getroffen werden, da kein Produkt am Markt verfügbar ist, welches den zu erfüllenden Anforderungen entspricht. Eine Berechnung über die Leistung der Dieselmotoren und den stündlichen Verbräuchen passender Brennstoffzellen soll wie bereits bei den Gabelstaplern und Baggern den Wasserstoffbedarf näherungsweise bestimmen.

Täglicher Wasserstoffbedarf Liebherr Mobilkran LHM500 =

$$3,69 \frac{h}{d} * \left(32,2944 \frac{kg H_2}{h} + 16,34904 \frac{kg H_2}{h} \right) = 179,49 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Liebherr Mobilkran LHM550 =

$$4,11 \frac{h}{d} * \left(32,2944 \frac{kg H_2}{h} + 32,2944 \frac{kg H_2}{h} \right) = 265,46 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Liebherr Mobilkran LHM150M

$$3,64 \frac{h}{d} * 32,2944 \frac{kg H_2}{h} = 117,55 kg$$

Täglicher Wasserstoffbedarf Mobilkran Mantisinen 100 =

$$1,46 \frac{h}{d} * 32,2944 \frac{kg H_2}{h} = 47,15 kg$$

Der potentielle durchschnittliche tägliche Wasserstoffbedarf der Hafenmobilkrane kann anhand nachfolgender Berechnung ermittelt werden:

$$\begin{aligned} &\text{Durchschnittlicher täglicher Wasserstoffbedarf Mobilkrane Braker Hafen} = \\ &\frac{179,49 kg [LHM500] + 265,46 kg [LHM550] + 117,55 kg [LHM150 M] + 47,15 kg [Man.100]}{4} = \\ &152,41 kg \end{aligned}$$

5.1.6 Reinigungsfahrzeuge

Für eine Substituierung der zwei Reinigungsfahrzeuge, die im Hafen eingesetzt werden, kommen wasserstoffbetriebene Spezialfahrzeuge von der FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG in Frage. Je nach Anforderungen an diese Fahrzeuge werden von FAUN Brennstoffzellen mit Leistungen zwischen 30 kW und 90 kW verbaut. Da jedes Fahrzeug, sofern es sich um ein Spezialfahrzeug handelt, für die Festlegung der benötigten Brennstoffzellenleistung untersucht werden muss, kann hier keine Aussage darüber getroffen werden, welche Leistung und dementsprechend welcher Wasserstoffbedarf von diesen Fahrzeugen ausgehen wird.

5.1.7 Gesamtwasserstoffbedarf der Umschlagprozesse

Anhand der nach Tabelle 21 anzustrebenden Entwicklung der Fahrzeugsubstitutionen in Kombination mit den zuvor erarbeiteten täglichen Wasserstoffbedarfen passender brennstoffzellenbetriebener Fahrzeugalternativen wird auf Seiten der Umschlagprozesse im Braker Hafen eine Entwicklung der täglichen Wasserstoffbedarfe gemäß Abbildung 34 angenommen. Die Werte für die einzelnen Fahrzeugarten sind Tabelle 30 zu entnehmen.

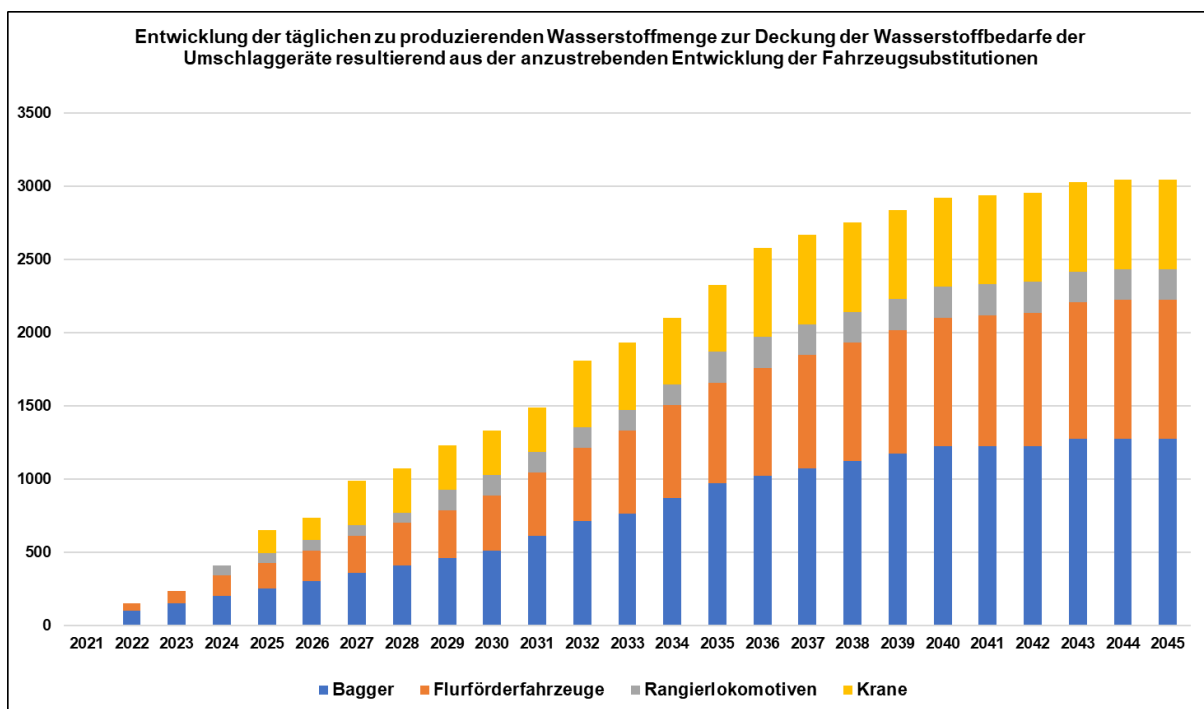


Abbildung 34: Entwicklung der täglichen Wasserstoffbedarfe der Umschlaggeräte resultierend aus der anzustrebenden Entwicklung der Fahrzeugsubstitutionen

Tabelle 30: Entwicklung der täglichen Wasserstoffbedarfe der Umschlaggeräte und Fahrzeuge im Braker Hafen [Kg/Tag]

Jahr	Gesamtbedarf	Bagger	Flurförderfahrzeuge	Rangierlokomotiven	Krane
2021	0	0	0	0	0
2022	153,78	102,18	51,6	0	0
2023	239,27	153,27	86	0	0
2024	412,04	204,36	137,6	70,08	0
2025	649,94	255,45	172	70,08	152,41
2026	735,43	306,54	206,4	70,08	152,41
2027	990,53	357,63	258	70,08	304,82
2028	1076,02	408,72	292,4	70,08	304,82
2029	1231,59	459,81	326,8	140,16	304,82
2030	1334,28	510,9	378,4	140,16	304,82
2031	1488,06	613,08	430	140,16	304,82
2032	1811,45	715,26	498,8	140,16	457,23
2033	1931,34	766,35	567,6	140,16	457,23
2034	2102,32	868,53	636,4	140,16	457,23
2035	2326,18	970,71	688	210,24	457,23
2036	2581,28	1021,8	739,6	210,24	609,64
2037	2666,77	1072,89	774	210,24	609,64
2038	2752,26	1123,98	808,4	210,24	609,64
2039	2837,75	1175,07	842,8	210,24	609,64
2040	2923,24	1226,16	877,2	210,24	609,64
2041	2940,44	1226,16	894,4	210,24	609,64
2042	2957,64	1226,16	911,6	210,24	609,64
2043	3025,93	1277,25	928,8	210,24	609,64
2044	3043,13	1277,25	946	210,24	609,64
2045	3043,13	1277,25	946	210,24	609,64

5.1.8 THG-Einsparung durch Einsatz von Wasserstofftechnologie in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake

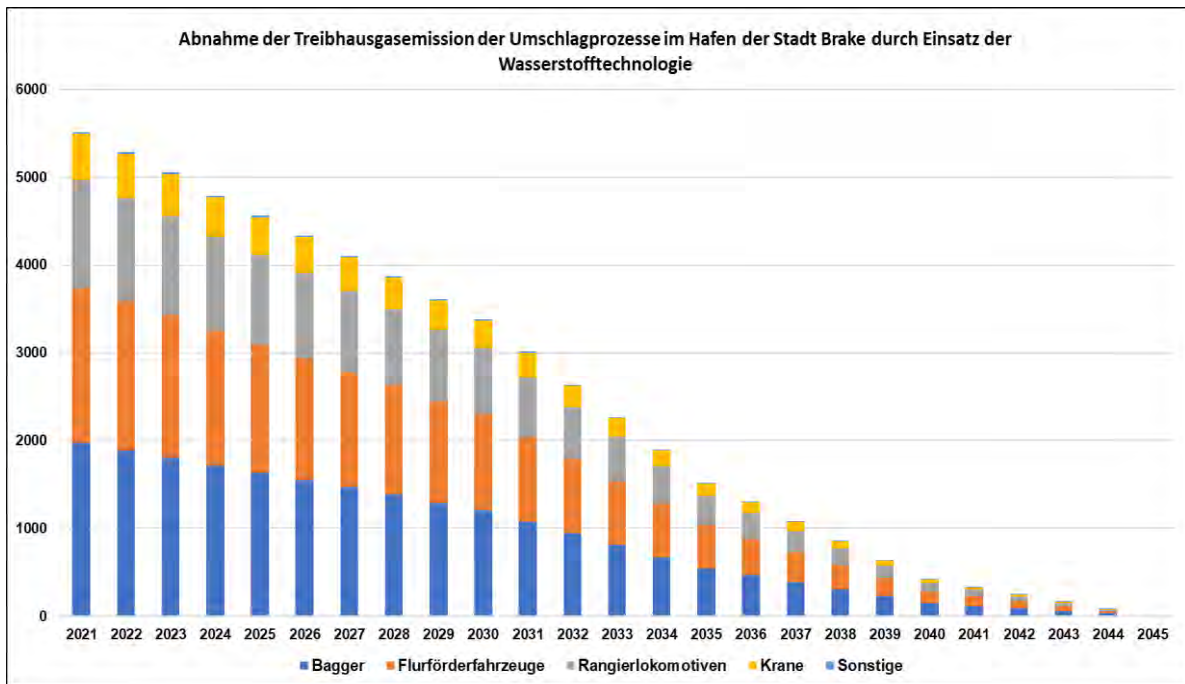


Abbildung 35: Abnahme der Treibhausgasemission der Umschlagprozesse im Hafen der Stadt Brake durch Einsatz der Wasserstofftechnologie

Insgesamt lassen sich durch Anwendung der Wasserstofftechnologie auf die Umschlagprozesse im Hafen der Stadt Brake Treibhausgasemissionen in Höhe von 5508,68 t CO₂e pro Jahr vermeiden. Die Verteilung dieser Emissionen auf die unterschiedlichen Fahrzeugtypen und der Verlauf ihrer anzustrebenden jährlichen Abnahme sind in Abbildung 35 dargestellt.

5.1.9 Ermittlung der Investitionskosten (CAPEX) für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake

Zu den Investitionssummen im Bereich der Umschlaggeräte, die für eine Substitution bestehender Fahrzeuge durch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge anzusetzen sind, konnten zum Zeitpunkt der Konzepterstellung (09/2021) keine Informationen von den etablierten Herstellern gewonnen werden.

Ohne Signalisierung eines konkreten Kaufinteresses ist kein Hersteller auf dem Gebiet der Umschlaggeräte bereit, Preise für die verfügbaren Produkte herauszugeben.

Eine Alternative zu der Anschaffung wasserstoffbetriebener Neufahrzeuge stellt die Umrüstung von Bestandsfahrzeugen dar. Dies ist eine schnell verfügbare Lösung und hat den Vorteil, dass im gleichen Zug ein fossil betriebenes Fahrzeug wegfällt.

Für die Umrüstung eines dieselbetriebenen Fahrzeugs zu einem brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeug bedarf es nach Rücksprache mit dem Umrüstunternehmen eCap Mobility⁷⁷ jedoch der Erstellung einer Machbarkeitsanalyse zum Umbau des Fahrzeugs, in der folgendes geklärt wird:

- Nutzungsprofil des Fahrzeugs
- Lastspitzen des Fahrzeugs
- Anforderungen an das wasserstoffbetriebene Antriebssystem
- Konstruktion des Fahrzeugs und Unterbringung der hinzukommenden Komponenten
- Maßnahmen zur Einhaltung sicherheitstechnischer Anforderungen

Ein Datenlogger misst dafür über einen Zeitraum von mindestens drei Monaten die Daten eines Fahrzeugs. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind nicht auf alle Fahrzeuge der Klasse übertragbar und müssen für alle Gewichtsklassen und Traglasten ermittelt werden. Somit muss auch für jede Fahrzeugklasse und die unterschiedlichen Typen eine eigene Studie durchgeführt werden.

5.1.10 Ermittlung der laufenden Kosten (OPEX) für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in den Umschlagprozessen im Hafen der Stadt Brake

Die laufenden Kosten eines brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugs setzen sich aus Wartungskosten und den Kosten des Wasserstoffs zusammen. Laut Brennstoffzellen-System-Hersteller muss mit ca. 2 bis 4% der Anschaffungskosten des Fahrzeuges an Wartungsaufwand gerechnet werden.⁷⁸

Die hauptsächlichen Kosten des Wasserstofffahrzeuges sind dem Wasserstoff zuzuordnen. Zurzeit liegen die Wasserstoffpreise bei ca. 8,00€ - 11,00€ (brutto). Für die folgenden Betrachtungen wird ein Wasserstoffpreis von 9,50 €/kg (brutto) angenommen. Bei der Herstellung größerer H₂ Mengen sind bereits heute 4,5€ - 6€ möglich. Da es sich bei dem nachfolgend zu Vergleichszwecken genannten Dieselpreis um den Nettodieselpreis handelt, wird auch hier mit dem Nettopreis eines Kilogramms Wasserstoff von in diesem Fall 7,98 €/kg kalkuliert.

Prinzipiell lassen sich die durchschnittlichen täglichen wasserstoffbedingten Betriebskosten für die Umschlaggeräte im Hafen der Stadt Brake anhand folgender simplen Formel berechnen:

⁷⁷ (78)

⁷⁸ (85)

Tägliche wasserstoffbedingte Kosten

$$= \text{Wasserstoffbedarf des Umschlaggeräts}_{\text{täglich}} \left[\frac{\text{kg H}_2}{\text{Tag}} \right] * 7,98 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Da die täglichen Wasserstoffbedarfe der Umschlaggeräte in diesem Konzept jedoch mangels in der Praxis bestätigter Verbrauchswerte der Hersteller näherungsweise kalkulierten wurden, wird von einer Kalkulation der voraussichtlichen wasserstoffbedingten Betriebskosten der Umschlaggeräte auf Basis der so ermittelten Werte in diesem Konzept Abstand genommen. Wie bereits an anderer Stelle erläutert sind die für die Berechnungen zugrunde gelegten Brennstoffzellenleistungen überdimensioniert, da in der Praxis mit einer Kombination aus Brennstoffzelle und Pufferbatterie agiert wird. In welchem Maße die in diesem Konzept angenommenen Brennstoffzellenleistungen überdimensioniert sind ist von Anwendungsfall zu Anwendungsfall unterschiedlich. Daher lässt sich auch kein allgemeiner Koeffizient ermitteln, mit dem sich eine Aussage über das Verhältnis zwischen Systemleistung und Brennstoffzellenleistung treffen lässt. Für belastbare Aussagen über anzunehmende wasserstoffbedingte Betriebskosten bedarf es näherer Informationen aus der Erprobung erster Testfahrzeuge.

Zumindest sind bereits Aussagen über die derzeitigen kraftstoffbedingten Betriebskosten der Umschlaggeräte möglich, um eine Kostenvergleichsrechnung und die Bestimmung eines notwendigen Wasserstoffpreises für eine Kostenparität der Betriebskosten vorzunehmen, sobald valide praxisnahe Daten zu den Verbräuchen und Kosten wasserstoffbetriebener Umschlaggeräte vorliegen.

Die im Hafen eingesetzten Rangierlokomotiven haben bei einer durchschnittlichen täglichen Einsatzzeit von 2,17 Stunden und einem Durchschnittsverbrauch von 166,67 Litern Diesel pro Stunde einen durchschnittlichen täglichen Dieselbedarf von 361,67 Litern. Die Dieselskosten⁷⁹ für Großverbraucher liegen derzeit (Oktober 2021) bei 1,23 €/l (netto), sodass für eine Rangierlokomotive tägliche durchschnittliche kraftstoffbedingte Betriebskosten von 444,85 € (netto) entstehen.

Die im Hafen der Stadt Brake eingesetzten Flurförderfahrzeuge haben eine durchschnittliche tägliche Einsatzzeit von 3,75 Stunden und einen Durchschnittsverbrauch von 13,30 Litern Diesel pro Stunde. Damit liegt der durchschnittliche tägliche Dieselbedarf bei 49,88 Litern. Die täglichen kraftstoffbedingten Betriebskosten liegen hier bei 61,35 € (netto).

Die im Hafen der Stadt Brake eingesetzten Bagger haben bei einer durchschnittlichen täglichen Einsatzzeit von 3,82 Stunden und einem Durchschnittsverbrauch von 17,54 Litern

⁷⁹ (86)

Diesel pro Stunde einen durchschnittlichen täglichen Dieselbedarf von 67,00 Litern und tägliche durchschnittliche kraftstoffbedingten Betriebskosten von 82,41 € (netto).

. Die Mobilkrane im Hafen haben mit einem durchschnittlichen stündlichen Dieselbedarf von 34,23 Litern und einer durchschnittlichen täglichen Einsatzzeit von 3,23 Stunden einen durchschnittlichen täglichen Dieselbedarf von 110,56 Litern. Die täglichen kraftstoffbedingten Betriebskosten liegen hier bei 135,99 € (netto).

5.2 Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake

Wie bereits in dem Abschnitt 4.3.9 erläutert sind die LKWs im Untersuchungsgebiet mit einem THG-Einsparpotential von 126,26 tCO₂e pro Fahrzeug und einem hohen Anteil an der Gesamtsumme der erhobenen Fahrzeuge mit der höchsten Priorität für einen Einsatz der Wasserstofftechnologie zu versehen. Diese Feststellung wird sowohl durch die verhältnismäßig hohe THG-Emission von insgesamt 19.444,44 tCO₂e, als auch durch die Größe der im Untersuchungsgebiet eingesetzten LKW-Flotte untermauert. Zusätzlich besteht bei den LKWs für die Anwendung der Wasserstofftechnologie der bedeutende Vorteil, dass bedingt durch die bereits am Markt verfügbaren und einsatzfähigen H₂-LKW-Modelle unterschiedlicher Hersteller, verglichen mit den anderen in diesem Konzept behandelten Fahrzeugklassen, die beste Ausgangslage für eine zeitnahe Anschaffung und den Einsatz von wasserstoffbetriebenen LKW vorliegt.

5.2.1 Wasserstoffbedarf für die Straßengüterlogistik der Stadt Brake

Um den Wasserstoffbedarf der von der Stadt Brake ausgehenden Straßengüterlogistik zu ermitteln, müssen zunächst die wesentlichen Transportdaten der Bestands-LKW erarbeitet und darauf Aufbauend passende am Markt verfügbare wasserstoffbetriebene LKW identifiziert werden, die als Ersatz für die konventionellen LKW geeignet sind. Die wichtigsten dabei zu beachtenden Parameter sind:

- Die durchschnittliche täglich zurückgelegte Strecke
- Die maximale Zuladung

Bedingt durch den starken Einfluss der im Hafen der Stadt Brake umgeschlagenen Hauptumschlaggüter Getreide und Futtermittel auf die Straßengüterlogistik, entfällt ein signifikanter Anteil des Verkehrsaufkommens auf den Nahverkehr, welcher diese Getreide und Futtermittel entweder direkt zu den landwirtschaftlichen Betrieben oder zu den im nahen

Umfeld der Stadt Brake niedergelassenen weiterverarbeitenden Betrieben transportiert. Weitere im Umland der Stadt Brake aufkommende Nahverkehrstransporte sind durch Milchsammelwagen gegeben, die kontinuierlich die Milchviehhöfe in der Wesermarsch anfahren, um von dort die im Braker Umland niedergelassenen weiterverarbeitenden Molkereibetriebe anzufahren. Zudem ist in Brake ein Unternehmen der Automobilzulieferindustrie angesiedelt, von dem aus die Produktionswerke diverser Fahrzeughersteller angefahren werden. Auch hier sind Nahverkehre nach Bremen zum Mercedes-Benz-Werk, aber auch Mittel- und Langstreckenverkehre zu anderen Herstellern zu verzeichnen.

Die identifizierten Nahverkehre haben gemein, dass die untersuchten LKW-Transporte hinsichtlich der zurückgelegten Strecke pro Tour selten eine Distanz von 150 Kilometern überschreiten, was im Übrigen ein wesentliches Charakteristikum von Getreide- und Futtermitteltransporten darstellt. Somit wäre die Versorgung der im Nahverkehr eingesetzten Wasserstoff-LKW bereits durch einen Tankstellenstandort im Hafen der Stadt Brake gesichert und das vielzitierte Henne-Ei-Problem in diesem Fall nicht mehr existent. Derzeit befindet sich eine Wasserstofftankstelle im Hafengebiet der Stadt Brake durch ein Konsortium unter Leitung der EWE Gasspeicher GmbH im Rahmen des Projekts Hyways for Future in Planung. Diese soll auf dem Gelände einer im Bau befindlichen Tank- und Rastanlage entstehen (siehe Abbildung 36). Die Lage der Tank- und Rastanlage ist in Abbildung 37 dargestellt.

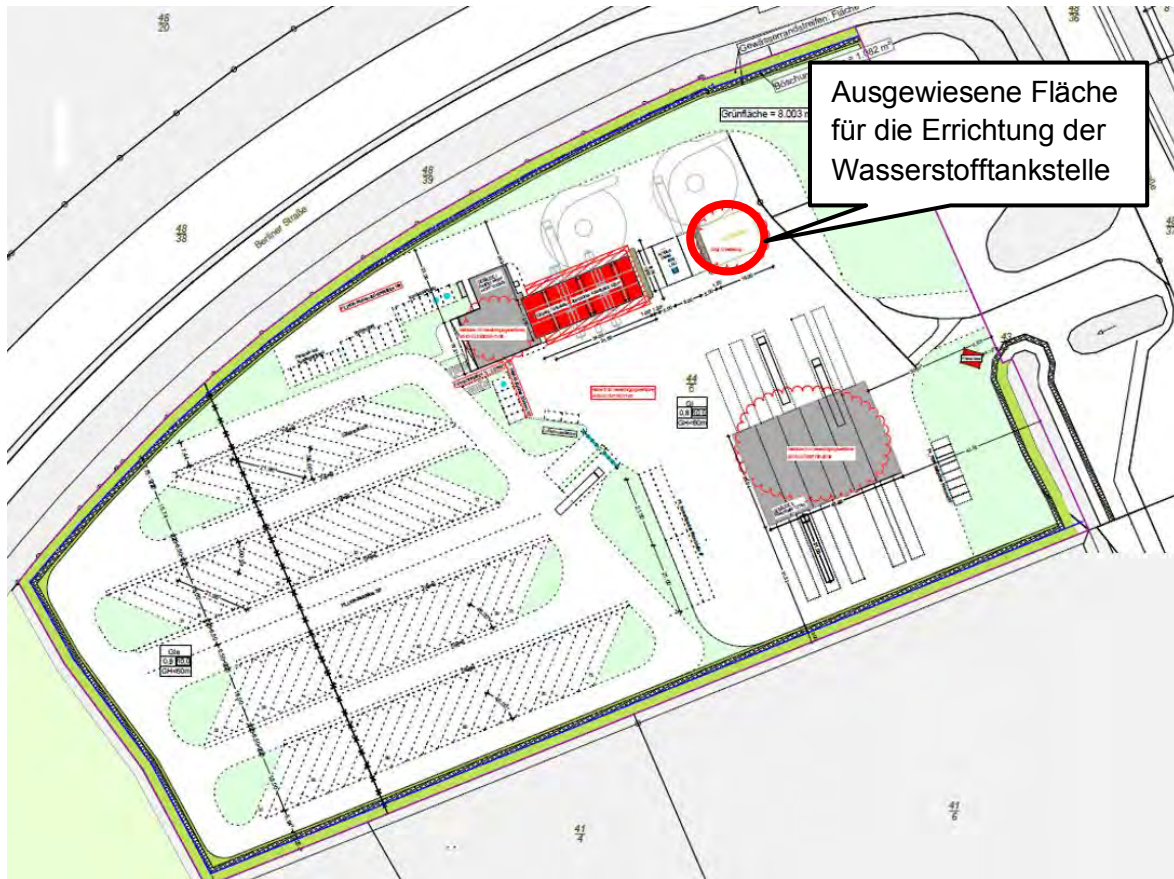


Abbildung 36: Lageplan der geplanten Tank- und Rastanlage im Braker Hafen gemäß Bauantrag der Truckpoint Braker Hafen GmbH vom 11.10.2021

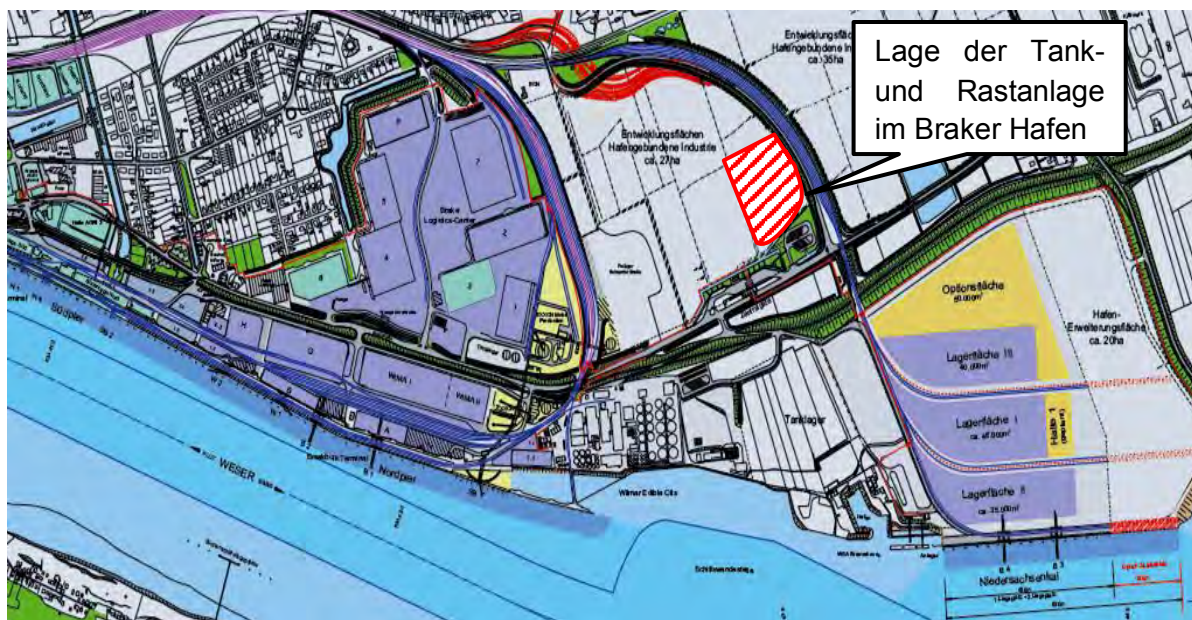


Abbildung 37: Lage der geplanten Tank- und Rastanlage im Braker Hafen

Über die zurückgelegte jährliche Gesamtfahrleistung der erhobenen LKW von 18.691.062,87 km bei 154 LKW lässt sich eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung von 121.370,54 Km pro LKW ermitteln. Diese resultiert, je nachdem wie viele Einsatztage zugrunde gelegt werden, in tägliche Fahrleistungen zwischen 337,17 km (360 Arbeitstage, aufgrund des Wegfalls des

Sonntagsfahrverbots bei dem Transport von Lebensmitteln abzüglich Ausfall- und Wartungszeiten) und 389,01 km (Einsatz an sechs Tagen pro Woche). In der nachfolgenden Betrachtung der am Markt verfügbaren LKW-Modelle wird schnell erkennbar, dass beide Distanzen bereits mit einer Tankfüllung zu bewerkstelligen sind.

Der deutlich herausforderndere Faktor für einen großskaligen Einsatz wasserstoffbetriebener LKW ist das derzeit noch geringe zulässige Gesamtgewicht der am Markt verfügbaren Modelle. Bis auf zwei Ausnahmen haben sämtliche erhobene LKW im Untersuchungsgebiet ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 t und reizen in der Regel die maximal zulässige Zuladung von 25t vollständig aus. Zum Zeitpunkt der Konzeptfertigstellung (Dezember 2021) ist lediglich der 40t-LKW von HYZON Motors bereits am Markt verfügbar.⁸⁰ Die LKW der Hersteller MAN, Volvo und Nicola mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t werden voraussichtlich erst zwischen 2023 und 2025 am Markt verfügbar sein. (siehe Tabelle 31).

Tabelle 31: Übersicht einer Auswahl von am Markt verfügbarer wasserstoffbetriebener Nutzfahrzeuge⁸¹

Fahrzeugart	Zul. GG [t]	Hersteller	Tankvolumen [kg]	Brennstoffzellenleistung [kW]	Reichweite [km]	Täglicher Wasserstoffbedarf [kg]	Drucksystem [bar]	Voraussichtliche Marktverfügbarkeit
LKW	7,5 t	Volvo	10 - 20	40 - 100	300	5 - 10	350 / 700	
LKW	20 t	Renault Truck	15 - 20	40 - 100		15 - 20	700	
LKW	20 t	Hyundai	15 - 20	40 - 100		15 - 20	700	
LKW	20t	FAUN auf Basis Mercedes-Benz Econic	16	90			700	2022
LKW	36 t	Hyundai	31	2 x 95	400	31 kg	350	
LKW	40 t	MAN	40 - 65	300	500	30 - 50	700	2023 – 2025
LKW	40 t	Volvo	40 - 65	300	500	30 - 50	700	2023
LKW	40 t	Nicola	40 - 65	300	500	30 - 50	700	unb.
LKW	40 t	HYZON	65	240	650	65	350	2021
LKW	42 t	Hyundai					350	unb.

⁸⁰ (87)

⁸¹ (53)

Um eine Aussage zu den sich einstellenden Wasserstoffbedarf treffen zu können, der sich in Folge einer sukzessiven Substitution der erhobenen LKW einstellt, werden im Folgenden die bekannten Daten des LKW-Modells von HYZON Motors verarbeitet. Das Unternehmen gibt den Wasserstoffverbrauch (kombiniert) des Modells HYZON HyMax-450 mit 10.7 kg/100 km an.⁸²

Für das Zurückzulegen der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung der erhobenen LKW von 121.370,54 km, benötigt ein HYZON HyMax-450 rund 12.986 kg Wasserstoff beziehungsweise rund 200 Tankfüllungen. Um die benötigte Menge an Wasserstoff für einen LKW herzustellen, muss ein Elektrolyseur in diesem Beispiel im Jahresdurchschnitt jeden Tag 35,57 kg Wasserstoff erzeugen. Daraus lässt sich die nachfolgend dargestellte jährliche Entwicklung der täglich zu produzierenden Wasserstoffmenge herleiten, die sich in mit einer Einhaltung des erarbeiteten Umsetzungsplans gemäß einstellt.



Abbildung 38: Entwicklung der täglich zu produzierenden Wasserstoffmenge zur Deckung des Wasserstoffbedarfs der LKW resultierend aus der anzustrebenden Entwicklung der Fahrzeugs substitutionen

⁸² (88)

Tabelle 32: Entwicklung des täglichen Wasserstoffbedarfs durch die in der Straßengüterlogistik zu substituierenden LKW [Kg/Tag]

Jahr	LKW
2021	0
2022	284,62
2023	533,67
2024	782,72
2025	960,61
2026	1174,08
2027	1423,12
2028	1636,59
2029	1921,22
2030	2134,68
2031	2490,47
2032	2881,82
2033	3237,61
2034	3628,96
2035	3984,75
2036	4198,21
2037	4411,68
2038	4625,15
2039	4874,20
2040	5087,67
2041	5158,82
2042	5229,98
2043	5336,71
2044	5407,87
2045	5479,02

Eine vollständig klimaneutrale Straßengüterlogistik im Jahr 2045 würde einen täglichen Wasserstoffbedarf von 5.479,02 kg zur Folge haben. Somit würde im Jahr 2045 der Einsatz eines Kilogramms Wasserstoff in der Straßengüterlogistik effektiv den Ausstoß von **9,72 kg CO₂e** vermeiden $[(19.444,44 \text{ t CO}_2 * 1000) / (5.479,02 * 365)]$.

Eine analoge Betrachtung der Treibhausgaseinsparung pro eingesetztem Kilogramm Wasserstoff in den Umschlagprozessen wurde an dieser Stelle bewusst nicht vorgenommen,

da die näherungsweise bestimmten Wasserstoffbedarfe in den Umschlagprozessen nicht die dafür notwendige Genauigkeit vorweisen.

5.2.2 TGH-Einsparpotential durch Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake

Während sich einige Geräte und Fahrzeuge auf Seiten der Umschlagprozesse nicht für eine Anwendung der Wasserstofftechnologie eignen, da sie bereits elektrisch betrieben werden und sich wesentlich effizienter mittels des Umstiegs auf die Nutzung von grünem Strom dekarbonisieren lassen, birgt die Anwendung der Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik das Potential zur Vermeidung sämtlicher Treibhausgasemissionen der erhobenen LKW. Damit ergibt sich durch den Einsatz von Wasserstoff für die erhobenen Fahrzeuge in der Straßengüterlogistik das volle Einsparpotential von 19.444,44 t CO₂e.

5.2.3 Ermittlung der Investitionskosten für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake

Über die Investitionskosten für die Anschaffung eines brennstoffzellenbetriebenen LKWs lassen sich zum Zeitpunkt der Konzepterstellung (09/2021) keine belastbaren Aussagen treffen. Eine eigens für dieses Konzept angefertigte Marktanalyse der ANLEG GmbH kommt zu dem Ergebnis, dass die voraussichtlichen Preise für die in Tabelle 31 aufgeführten LKW in einem Bereich zwischen 300.000 € für den 7,5 Tonner von Volvo und 800.000 € für die 40 Tonner von MAN und Volvo liegen werden.

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gewährt in der Richtlinie KsNI vom 2. August 2021 bei der Anschaffung eines brennstoffzellenbetriebenen LKW einen nicht rückzahlungspflichtigen Zuschuss in Höhe von 80 % der Investitionsmehrausgaben im Vergleich zu einem dieselpbetriebenen LKW. Unter Investitionsmehrausgaben im Sinne dieser Richtlinie sind die Ausgaben zu verstehen, die erforderlich sind, um anstelle eines Nutzfahrzeugs mit konventionellem Antrieb der Schadstoffklasse Euro 6/Euro VI bzw. der jeweils geltenden höchsten Schadstoffklasse, ein vergleichbares Nutzfahrzeug mit Brennstoffzelle oder einem batterieelektrischen Antrieb zu erwerben.⁸³

Auf dem Portal Mobile.de, dass sich als nahezu einzige Quelle für realistische Preise herausstellte, konnte für eine Standard Sattelzugmaschine des Herstellers Volvo Truck mit

⁸³ (54)

dem Typ FH 4x2 500 HP ein Neuanschaffungspreis in Höhe von 110.670 € ermittelt werden.⁸⁴ Unter der Annahme, dass die Anschaffungskosten eines brennstoffzellenbetriebenen LKW des Herstellers Volvo Truck 800.000 € betragen sind Investitionsmehrausgaben in Höhe von 689.330 € zu beziffern. Von diesen Investitionsmehrausgaben würden 551.464 € staatlich bezuschusst werden, sodass der Investitionsaufwand in diesem Beispiel 248.536 € beträgt und 137.866 € an finalen Mehrkosten für den Käufer entstehen. Die Investitionskosten für die Anschaffung eines brennstoffzellenbetriebenen LKW sind aufgrund der Tatsache, dass sich die Hersteller noch in der Entwicklungsstufe befinden, lediglich als Momentaufnahme zu verstehen und werden mit der Produktion größerer Stückzahlen dank des Skaleneffekts kontinuierlich sinken.

5.2.4 Ermittlung der laufenden Kosten für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Straßengüterlogistik der Stadt Brake

Hinsichtlich der Wartungskosten von brennstoffzellenbetriebenen LKW wird auch hier die Angabe der Brennstoffzellen-System-Hersteller herangezogen, nach der mit ca. 2 bis 4% der Anschaffungskosten des Fahrzeuges an Wartungsaufwand gerechnet werden muss.

Der größte Anteil an den Betriebskosten geht, wie bereits im Falle der Umschlaggeräte, von den Wasserstoffkosten aus. Für einen Vergleich zwischen konventionellem und brennstoffzellenbetriebenen LKW wird ein weiteres Mal mit Nettowasserstoffkosten in Höhe von 7,98 €/kg und einem Nettodieselpreis von 1,23 €/l kalkuliert. Die zurückgelegte Strecke pro Jahr soll der realen durchschnittlichen Strecke der erhobenen Fahrzeuge von 121.370,54 km entsprechen. Auch hier soll der HYZON HyMax-450 mit einem Wasserstoffverbrauch von 10,7 kg / 100 km als Referenzfahrzeug dienen. Damit stellen sich ein Wasserstoffbedarf von 0,107 kg/km und damit einhergehende wasserstoffbedingte Betriebskosten von 0,85 €/km ein.

Die erhobenen Diesel-LKW weisen einen durchschnittlichen Dieserverbrauch von 0,331 l/km und damit treibstoffbedingte Betriebskosten von 0,41 €/km auf. Die CO₂-Bepreisung (2021) ist bereit in dem aktuellen Dieselpreis enthalten.

Ein großer Betriebskostenvorteil auf Seiten der brennstoffzellenbetriebenen LKW ist durch den Wegfall der Maut gegeben. Mit der 5. Änderung zum Bundesfernstraßenmautgesetz, die seit dem 01.01.2019 gilt, fällt für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen, die entweder elektrisch oder mit Erdgas angetrieben werden keine Maut an. Bei Letzteren war die Mautbefreiung allerdings bis zum 31.12.2020 begrenzt. Im Sinne des § 2 Nummer 1 des Elektromobilitätsgesetzes gelten reine Batterie-Elektrofahrzeuge, von außen aufladbare

⁸⁴ (55)

Hybrid-Elektrofahrzeuge oder Brennstoffzellenfahrzeuge als elektrisch betriebene Fahrzeuge.⁸⁵

Tabelle 33: Mautsätze in Abhängigkeit der Emissionsklasse sowie der Achsanzahl und dem zulässigen Gesamtgewicht⁸⁶

Emissionsklasse	zGG** / Achszahl	Infrastruktur	Luft	Lärm	Summe
Euro 6	7,5 t bis <12 t	0,065 €	0,012 €	0,002 €	0,079 €
	12 t bis 18 t	0,112 €	0,012 €	0,002 €	0,126 €
	> 18 t bis 3 Achsen	0,155 €	0,012 €	0,002 €	0,169 €
	> 18 t ab 4 Achsen	0,169 €	0,012 €	0,002 €	0,183 €
Euro 5 / EEV	7,5 t bis <12 t	0,065 €	0,023 €	0,002 €	0,090 €
	12 t bis 18 t	0,112 €	0,023 €	0,002 €	0,137 €
	> 18 t bis 3 Achsen	0,155 €	0,023 €	0,002 €	0,180 €
	> 18 t ab 4 Achsen	0,169 €	0,023 €	0,002 €	0,194 €
Euro 4 / Euro 3 mit Filter PMK*2 oder höher	7,5 t bis <12 t	0,065 €	0,034 €	0,002 €	0,101 €
	12 t bis 18 t	0,112 €	0,034 €	0,002 €	0,148 €
	> 18 t bis 3 Achsen	0,155 €	0,034 €	0,002 €	0,191 €
	> 18 t ab 4 Achsen	0,169 €	0,034 €	0,002 €	0,205 €
Euro 3 / Euro 2 mit Filter PMK*1 oder höher	7,5 t bis <12 t	0,065 €	0,067 €	0,002 €	0,134 €
	12 t bis 18 t	0,112 €	0,067 €	0,002 €	0,181 €
	> 18 t bis 3 Achsen	0,155 €	0,067 €	0,002 €	0,224 €
	> 18 t ab 4 Achsen	0,169 €	0,067 €	0,002 €	0,238 €
Euro 2	7,5 t bis <12 t	0,065 €	0,078 €	0,002 €	0,145 €
	12 t bis 18 t	0,112 €	0,078 €	0,002 €	0,192 €
	> 18 t bis 3 Achsen	0,155 €	0,078 €	0,002 €	0,235 €
	> 18 t ab 4 Achsen	0,169 €	0,078 €	0,002 €	0,249 €
Euro 1 und 0	7,5 t bis <12 t	0,065 €	0,089 €	0,002 €	0,156 €
	12 t bis 18 t	0,112 €	0,089 €	0,002 €	0,203 €
	> 18 t bis 3 Achsen	0,155 €	0,089 €	0,002 €	0,246 €
	> 18 t ab 4 Achsen	0,169 €	0,089 €	0,002 €	0,260 €

* PMK – Partikelminderungsklassen sind Nachrüstungsstandards zur Senkung des Partikelaustrittes.

** zulässiges Gesamtgewicht

Tabelle 33 zeigt die Höhe der anfallenden Mautsätze in €/km, welche in Abhängigkeit von der Emissionsklasse und der Achs- und Gewichtsklasse des mautpflichtigen LKW anfallen. Da im Falle eines neuangeschafften Diesel-LKW von der Euro 6 Schadstoffklasse ausgegangen werden sollte und alle erhobenen LKW bis auf zwei Ausnahmen ihr zulässiges Gesamtgewicht von 40 t komplett ausnutzen wird ein Mautsatz von 0,183 €/km für ein LKW mit zulässigem Gesamtgewicht über 18 t und mehr als drei Achsen zugrunde gelegt.

⁸⁵ (56)

⁸⁶ (57)

Tabelle 34: Gegenüberstellung der antriebsbedingten Betriebskosten von Diesel- und BZ-LKW

Betriebskosten exkl. Wartung		
	BZ-LKW	Diesel LKW
Treibstoffkosten (netto)	0,850 €/km	0,410 €/km
Mautkosten	0,000 €/km	0,183 €/km
Summe	0,850 €/km	0,593 €/km

Verglichen mit den Betriebskosten der im Umschlag eingesetzten Fahrzeuge lässt sich erahnen, dass eine Betriebskostenparität hier bereits mit höheren Wasserstoffpreisen zu erzielen ist, als es bei den Umschlaggeräten und Fahrzeugen der Fall war. Dort konnten die Rangierlokomotiven mit einer Betriebskostenparität ab einem Wasserstoffpreis von 6,35 €/kg (netto) und 7,55 €/kg (brutto) das beste Ergebnis erzielen. Im vorausgegangenen Vergleich zwischen einem Konventionellen LKW mit einem Dieselbedarf von 33,1 l/100km und dem HYZON HyMax-450 mit einem Wasserstoffverbrauch von 10,7 kg/100km wäre eine Betriebskostenparität bereits ab einem Wasserstoffpreis von 5,54 €/kg (netto) gegeben, was einen **Bruttowasserstoffpreis** von **6,59 €/kg** entspricht.

5.3 Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung für den Schiffsverkehr in der Stadt Brake

Die stark ausgeprägte internationale Ausrichtung des Schifffahrtssektors spielt bei der Auswahl alternativer Antriebsformen eine wichtige Rolle. Auch wenn im Rahmen H2BrakeCO2 zunächst nur die im Untersuchungsgebiet agierenden Schiffe betrachtet werden, legt die Planung des in Brake eingesetzten Treibstoffes einen Grundstein, der ausschlaggebend für das zukünftige Tankangebot des Braker Hafens sein wird. Diesbezüglich wird sich innerhalb des Konzeptes H2BrakeCO2 auf den Treibstoff Methanol festgelegt. Der neueste Treibhausgas-Report der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation (IMO) führt auf, dass sich Methanol in dem Zeitraum von 2012 bis 2018 nach Schweröl, Marinediesel und LNG zu dem viertwichtigsten Treibstoff etablierte. Im Jahr 2018 ist der Verbrauch auf etwa 130.000 t auf internationalen Routen angewachsen.⁸⁷ Für eine erfolgreiche weltweite Etablierung nachhaltiger Treibstoffe möchte sich H2BrakeCO2 diesem nachweislichen Trend anschließen. Diese Entwicklung lässt sich auf die vergleichsweise vorteilhafte Anwendung von Methanol zurückführen. Gegenüber den herkömmlich eingesetzten Treibstoffen weist Methanol in Bezug auf die Temperatur [°C] und den Druck [bar] die gleichen kraftstoffspezifischen Eigenschaften zu herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff in der Schifffahrt auf. Lediglich die Energiedichte [kWh/l]

⁸⁷ (104), S. 6

liegt mit 4,4 kWh/l weit unter den herkömmlichen Energiedichten von Schweröl mit 11,4 kWh/l und von Dieselmotortreibstoff mit 10 kWh/l. Der Einsatz von Wasserstoff gestaltet sich in Hinblick auf die benötigten Energiemengen auf Grund des hohen geforderten Drucks von 700 bar bei Druckwasserstoff und einer Temperatur von -120°C bei Flüssigwasserstoff wesentlich komplizierter. Somit besteht bei dem Einsatz von Methanol gegenüber Wasserstoff auch ein hoher infrastruktureller Vorteil. Außerdem lassen sich die Energiedichten von Druck- und Flüssigwasserstoff mit 2,4 und 1,9 kWh/l noch niedriger als die Energiedichte von Methanol einordnen.⁸⁸

Neben den kraftstoffspezifischen Eigenschaften und der internationalen Ausrichtung spielt ebenfalls der Herstellungsprozess eine wichtige Rolle und ist ausschlaggebend für den Well-To-Wheel Faktor des Treibstoffes und die ganzheitliche Betrachtung der nachhaltigen Wirkung. Im Falle von Methanol kann die Herstellung über verschiedene Prozesse realisiert werden. Die unterschiedlichen Herstellungspfade sind in Abbildung 39 aufgezeigt. Hierbei wird die Umweltverträglichkeit über die Farben Grün, Blau, Grau und Braun definiert. Von Grün nach Braun steigt die Kohlenstoffdichte an.

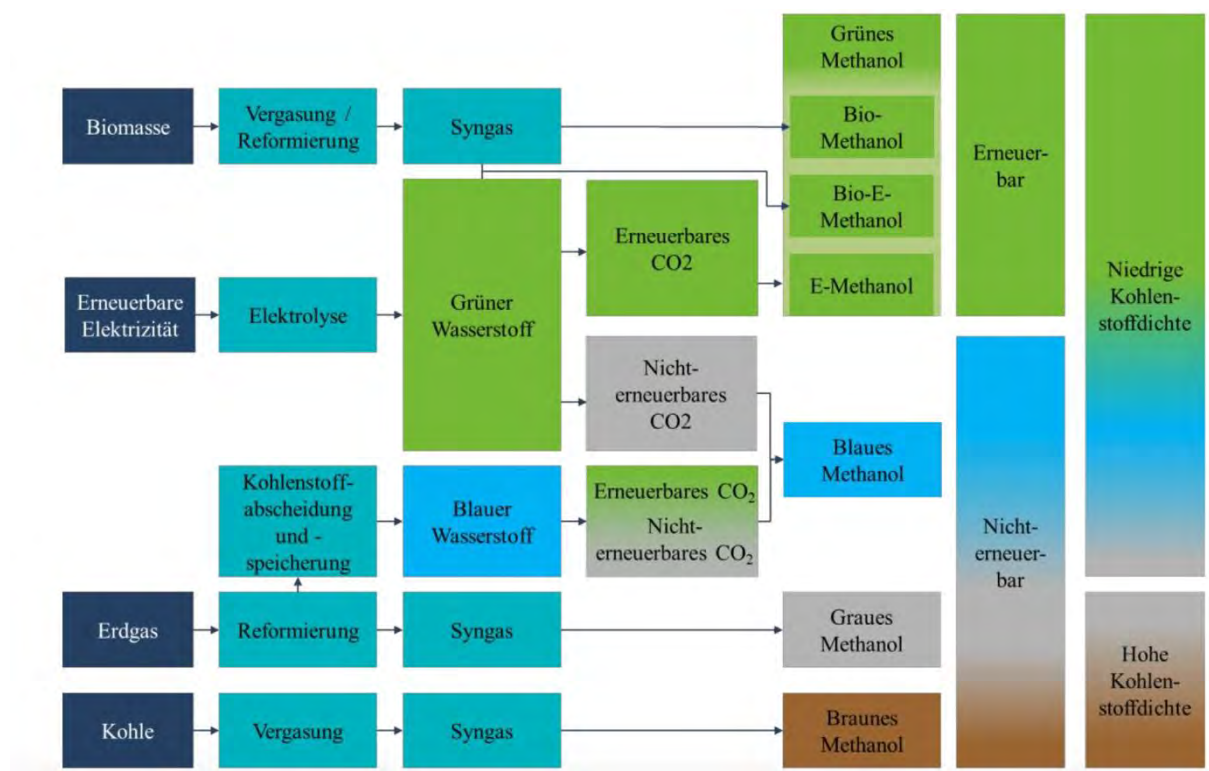


Abbildung 39: Herstellungspfade von Methanol unterteilt in grünes, blaues, graues und braunes Methanol (Darstellung aus Masterarbeit von Anna - Maria Frei nach Angaben von C. Chatterton übernommen.⁸⁹)

⁸⁸ (106 S. 86)

⁸⁹ (108 S. 5), (110 S. 20)

Die Vielseitigkeit der Herstellungsverfahren macht Methanol sowohl zu einer attraktiven kurzfristigen, als auch mittelfristigen und langfristigen Lösung bezüglich der notwendigen THG-Emissionseinsparung bis 2045. In Abbildung 39 wird jedoch ersichtlich, dass nicht alle Herstellungsprozesse zu der gleichen THG-Emissionseinsparung führen. Der Fokus des Projektes H2BrakeCO2 liegt auf der Einsparung von CO2-Emissionen durch Wasserstoff. Diesbezüglich kommt nur die Nutzung von blauem und grünem Methanol in Frage. Die Lebensdauer von Schiffen liegt durchschnittlich bei 20 - 30 Jahren⁹⁰ und verlangt nach schnellen Neu- oder Umbauten, um kurzfristig anhaltende THG-Einsparungen zu realisieren. Aktuell basiert ca. 90% des hergestellten Methanols auf Erdgas. Bis eine prozentuale Verschiebung hin zu der Nutzung erneuerbarer Ressourcen bei der Methanol-Herstellung erfolgt, kann die Verwendung von Blauem Methanol eine kurzfristige Lösung darstellen, die mittelfristig durch den Abschluss des nötigen Ausbaus der Wasserstoffinfrastruktur durch grünes Methanol oder den Import grünen Methanols abgelöst werden kann. Dennoch ist darauf hinzuweisen, dass bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Methanol die THG-Emissionen höher sind als bei dem Einsatz von Diesel, sofern die Methanol-Herstellung nicht auf erneuerbaren Energien basiert.⁹¹

Im Rahmen dieser Studie beziehen sich die Berechnungen bzgl. des THG-Emissionseinsparpotential auf die Nutzung von grünem Methanol, bei dessen Herstellung auf durch erneuerbare Energien hergestellten Wasserstoff und aus Industrieprozessen oder aus der Atmosphäre entnommenes CO2 zurückgegriffen wird. Hierbei schließt sich der Kreislauf von durch die Verbrennung von Methanol emittierten CO2 und dem für die Herstellung des Treibstoffs entnommenen CO2. In Kombination mit Grünem Wasserstoff entsteht ein nahezu klimaneutraler Kraftstoff.

In den folgenden Unterkapiteln wird der Mindest-Methanol-Bedarf ermittelt, der jährlich für den Betrieb der 23 identifizierten Schiffe zur Verfügung stehen muss. Aus diesem Bedarf lässt sich anschließend die Menge an Wasserstoff berechnen, die zu der Herstellung des Methanol-Bedarfs produziert werden muss. An Hand dieser Bedarfe werden Einschätzungen bezüglich der Betriebskosten und der notwendigen Investitionskosten getroffen. Anders als im Straßengüterverkehr, sowie bei den Umschlaggeräten wird im Bereich der Schifffahrt nicht von einem Umstieg auf Brennstoffzellentechnologie ausgegangen, sondern von der Anpassung herkömmlicher Verbrennungsmotoren auf den Einsatz von Methanol.

In Tabelle 35 sind die charakteristischen Eigenschaften der identifizierten Schiffstypen aufgezeigt. Auf diese Angaben wird sich in den folgenden Unterkapiteln als

⁹⁰ (112)

⁹¹ (113 S. 12)

Rechnungsgrundlagen und bei den Umsetzungsempfehlungen bezogen.

Tabelle 35: Datengrundlage zur Berechnung der Methanol- und Wasserstoffbedarfe, sowie zur Ausarbeitung der Anwendungsfälle im Schifffahrtssektor

Schiffstyp	Anzahl	Einge- setzter Treibstoff	Leistung [kW]	Tankvolumen [l]	Jahresverbrauch [l/a]
Fahrzeug- und Personenfähre	1	Marine Diesel	148	12.000	220.000
Personenfähre	1	GTL*	115	1.100	8.000
Tonnenleger	1	Marine Diesel	1500	50.000	7.353
Versorgungsschiff	1	Marine Diesel	1200	30.000	2.941
Versorgungsschiff	1	Marine Diesel	200	5.000	7.353
Ufersicherungsschiff	1	Marine Diesel	900	5.000	73.529
Ufersicherungsschiff	1	Marine Diesel	200	5.000	14.706
Peilboot	1	Marine Diesel	110	7.500	2.965
Peilboot	1	Marine Diesel	200	5.000	14.706
Peilboot	1	Marine Diesel	200	2.000	14.706
Gewässerkundeboot	1	Marine Diesel	200	5.000	14.706
Bunkerschiff	1	Marine Gas Oil	404	36.000	40.878
Bunkerschiff	1	Marine Gas Oil	296	5.000	41.824
Schlepper	4	Marine Diesel	1.600 – 5.310	240.000	170.957
Schlepper	1	Marine Diesel	1.860	260.000	
Schlepper	3	Marine Diesel	3.165 - 4635	270.000	
Schlepper	1	Marine Diesel	5.295	280.000	
Schlepper	1	Marine Diesel	5.000	285.000	

5.3.1 Methanol-Bedarf für den Schiffsverkehr in der Stadt Brake

Um den Methanol-Bedarf zu errechnen, der notwendig zur Abdeckung des jährlichen Treibstoffbedarfs der im Untersuchungsgebiet identifizierten Schiffstypen ist, wurde sich auf die Angabe des herkömmlichen Jahresverbrauchs an Treibstoff bezogen. Basierend auf der Energiedichte von Methanol welche gegenüber den herkömmlich in der Schifffahrt

eingesetzten Treibstoffen ca. zwei- bis dreimal kleiner ausfällt wird davon ausgegangen, dass die benötigte Menge an Methanol zwei- bis dreimal höher ausfällt.⁹² Im Rahmen dieser Studie wird demnach ein Faktor von 2,5 verwendet.

Somit ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des jährlichen Gesamtbedarfs an Methanol pro Jahr:

$$\text{Methanolbedarf} \left[\frac{l}{a} \right] = \text{herkömml. Jahresverbrauch} \left[\frac{l}{a} \right] \times 2,5$$

Bei Betrachtung des gesamten jährlichen Kraftstoffverbrauchs des Schiffssektors im Untersuchungsgebiet von 634.624 l/a, werden 1.586.560 l Methanol pro Jahr benötigt, um den Gesamtjahresbedarf abzudecken.

Tabelle 36: Darstellung des Methanol-Bedarfs bei Betrachtung aller identifizierten Schiffstypen

Σ Jahresverbrauch [l/a]	Umrechnungsfaktor	Σ Methanolbedarf [l/a]
634.624	2,5	1.586.560

Auf Grund der stark variierenden stündlichen Kraftstoffverbräuche im Schifffahrtssektor kann nicht die gleiche Berechnungsmethode, wie für die landseitige Logistik genutzt werden. Die Höhe des Treibstoffverbrauchs variiert je nach Strömungsverhältnissen und meteorologischen Bedingungen. Außerdem ist ein Großteil der Arbeitsschiffe nicht kontinuierlich im Einsatz. Um jedoch eine Größenorientierung angeben zu können, wurden für Tabelle 37 Durchschnittswerte errechnet und an den Umsetzungsplan von H2BrakeCO2 angepasst. Diesbezüglich wurde der jährliche Methanol-Bedarf durch die Anzahl der Schiffe geteilt. Außerdem wird von einem 24-stündigen Einsatz an 360 Tagen im Jahr ausgegangen.

⁹² (110)

Tabelle 37: Entwicklung des jährlichen und täglichen Methanol-Bedarfs angepasst an den Umsetzungsplan von H2BrakeCO2

Jahr	Anzahl Schiffe	Jährl. Methanolbedarf [l/a]	tägl. Methanolbedarf [l/d]
2021	0	0	0
2022	1	68.980,87	191,61
2023	2	137.961,74	383,22
2024	4	275.923,48	766,44
2025	4	275.923,48	766,44
2026	5	344.904,35	958,05
2027	6	413.885,22	1.149,66
2028	7	482.866,09	1.341,27
2029	8	551.846,96	1.532,88
2030	9	620.827,83	1.724,49
2031	11	758.789,57	2.107,71
2032	12	827.770,44	2.299,32
2033	14	965.732,18	2.682,54
2034	16	1.103.693,92	3.065,76
2035	17	1.172.674,79	3.257,37
2036	18	1.241.655,66	3.448,98
2037	19	1.310.636,53	3.640,59
2038	20	1.379.617,4	3.832,2
2039	21	1.448.598,27	4.023,81
2040	22	1.517.579,14	4.215,42
2041	22	1.517.579,14	4.215,42
2042	22	1.517.579,14	4.215,42
2043	23	1.586.560,01	4.407,03
2044	23	1.586.560,01	4.407,03
2045	23	1.586.560,01	4.407,03

Für die Entwicklung des Methanol-Bedarfs bis 2045 wurde ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der Schiffstypen angenommen. Tabelle 35 zeigt jedoch auf, wie stark die Treibstoffverbräuche pro Schiffstyp variieren. Somit kann davon ausgegangen werden, dass je nach Einsatzzweck und umgebauten Schiffstyp abweichende Bedarfe anfallen. Im Sinne des schnellen Voranschreitens des Klimawandels und der Notwendigkeit von CO₂-Emissionseinsparungen, sollten Schiffstypen mit höheren Verbräuchen priorisiert und frühestmöglich umgebaut werden. Unter den in diesem Projekt erhobenen Schiffen ist der

Verbrauch der Ufersicherungsschiffe und der Verbrauch der Fahrzeug- und Personenfähre am höchsten. Insbesondere letztere bietet sich für eine bevorzugte Umstellung auf einen Betrieb mit Methanol an, da es sich hier um ein ausschließlich in Brake operierendes Schiff handelt dessen Versorgung mit Methanol dank der lokal entstehenden Wasserstoffinfrastruktur sichergestellt wäre.

5.3.2 Wasserstoffbedarf für den Schiffsverkehr in der Stadt Brake

Aus dem errechneten Methanol-Bedarf lässt sich nun ableiten, wie viel Wasserstoff zur Verfügung stehen muss, um die Herstellung der geforderten Menge an Methanol gewährleisten zu können. Die folgenden Angaben beziehen sich auf die Herstellung von Power-to-Liquid (PtL) Methanol. Diese Bezeichnung bezieht sich auf die Umwandlung von elektrischer Energie in Flüssigkraftstoffe. Bei der Methanol-Synthese wird auf die Ressource Wasser, Kohlenstoffdioxid und elektrischen Strom zugegriffen. Die vollständige Prozesskette wird in einer Darstellung des Fraunhofer Instituts ISE in Abbildung 40 näher betrachtet. Im Falle des Forschungsprojektes H2BrakeCO2 entspricht die Schifffahrt der Hauptanwendung und ist rechts unter dem Anwendungsfeld Mobilität zu subsumieren.

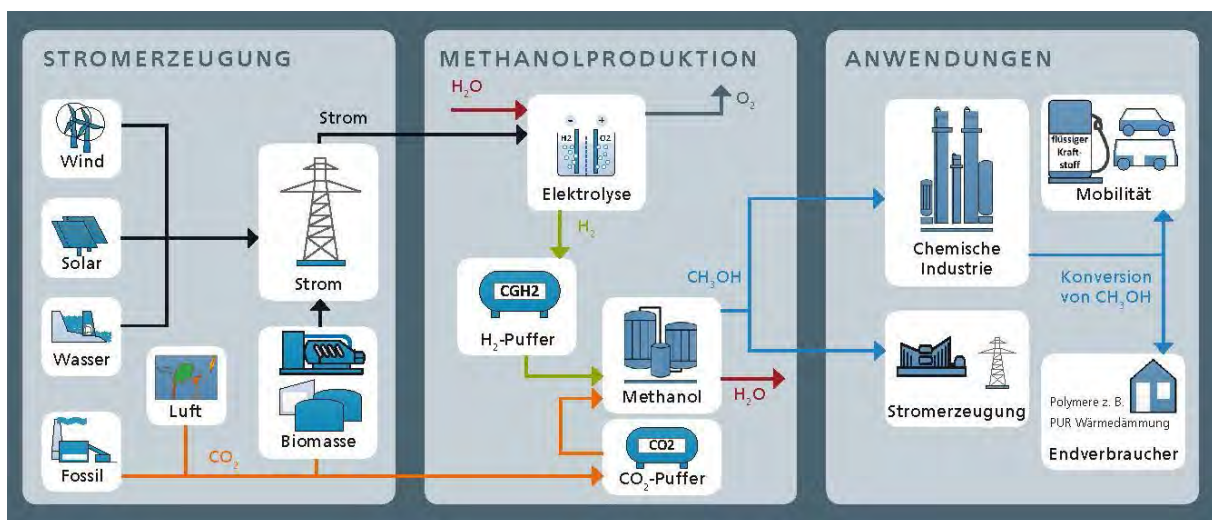


Abbildung 40: Herstellung und Anwendung von PtL-Methanol ⁹³

Nach der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in Auftrag gegebenen Studie „Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger“ werden zur Herstellung von 1 kg Methanol 0,19 bis 0,20 kg Wasserstoff und 1,4 kg bis 1,5 kg CO₂ mit einem Verbrauch von 10,9 bis 12,5 kWh elektrischem Strom benötigt.⁹⁴ An Hand dieser Angaben lässt sich sowohl für den Gesamtverbrauch, als auch für die durchschnittlichen Jahres- und

⁹³ (111)

⁹⁴ (114)

Tagesbedarfe an Methanol bis 2045 (siehe Tabelle 37) die notwendige Menge an Wasserstoff errechnen.

Aus dem Gesamtbedarf des Untersuchungsgebiet von 1.586.560 l Methanol ergibt sich unter Berücksichtigung einer Dichte von 0,79 kg/l für Methanol eine Bedarfsmenge von 1.253.382,4 kg. Dies entspricht 1.253,4 t Methanol. Bei Verwendung einer durchschnittlichen Menge von 0,195 kg Wasserstoff pro 1 kg Methanol ergeben sich die in Tabelle 38 aufgezeigten Wasserstoffbedarfe zur Abdeckung der Methanol Herstellung für H2BrakeCO2 bis 2045 basierend auf folgender Formel:

$$\text{Wasserstoffbedarf} \left[\frac{\text{kg}}{\text{a}} \right] = \text{Methanolbedarf} \left[\frac{\text{l}}{\text{a}} \right] \times 0,79 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 0,195$$

Tabelle 38: Jährlich und täglich notwendige Wasserstoffmengen zur Abdeckung des Bedarfs der Herstellung von Methanol für das Untersuchungsgebiet Brake

Jahr	Anzahl Schiffe	Jährl. H2-Bedarf [kg/a]	tägl. H2-Bedarf [kg/d]
2021	0	0	0
2022	1	10.626,50	29,52
2023	2	21.253,01	59,04
2024	4	42.506,01	118,07
2025	4	42.506,01	118,07
2026	5	53.132,52	147,59
2027	6	63.759,02	177,11
2028	7	74.385,52	206,62
2029	8	85.012,02	236,14
2030	9	95.638,53	265,66
2031	11	116.891,53	324,69
2032	12	127.518,04	354,21
2033	14	148.771,04	413,25
2034	16	170.024,05	472,28
2035	17	180.650,55	501,80
2036	18	191.277,05	531,32
2037	19	201.903,56	560,83
2038	20	212.530,06	590,35
2039	21	223.156,56	619,87
2040	22	233.783,07	649,39
2041	22	233.783,07	649,39
2042	22	233.783,07	649,39
2043	23	244.409,57	678,90
2044	23	244.409,57	678,90
2045	23	244.409,57	678,90

Somit ergibt sich für den Schifffahrtsektor eine Gesamtmenge von 244,4 t Wasserstoff pro Jahr, die in Brake produziert werden muss, um den Gesamt-Methanol-Bedarf von 1.586.560 l/a herstellen zu können.

5.3.3 THG-Einsparpotential durch Einsatz von auf Wasserstoff basierender Methanol-Technologie im Schiffsverkehr der Stadt Brake

Bei Betrachtung des THG-Emissionseinsparpotential des Einsatzes von Methanol als alternativen Treibstoff spielt die Art und Weise der Herstellung des Methanols eine relevante Rolle. Basiert die Methanol-Herstellung auf fossilen Ressourcen kann die THG-Emission sogar höher liegen als die von Marine Diesel. Wird sich auf die Herstellung durch Strom aus erneuerbaren Energien und aus der Luft oder Industrieprozessen gewonnenes CO₂ bezogen, fallen die Emissionen wesentlich geringer aus. Mit einem Verbrauch von 634.624 l pro Jahr ergibt sich eine jährliche Emission von 2.235,9 tCO₂e/a unter Verwendung der in Tabelle 39 aufgelisteten Faktoren, welche sich auf die Well-To-Wheel Betrachtung beziehen. Bei einem Kraftstoffbedarf von 1.586.560 l/a Methanol ergeben sich lediglich 97,26 tCO₂e (siehe Tabelle 40). Somit ermöglicht die Anwendung von grünem Methanol ein THG-Einsparpotential von 95,65% gegenüber den THG-Emissionen im Ist-Zustand.

Tabelle 39: CO₂e-Emissionen der wasserseitigen Logistik des Untersuchungsgebietes H2BrakeCO₂ im Ist-Zustand

Kraftstoffverbrauch [l/a]	Kraftstoff	Heizwert [MJ/l]	Faktor THG-Emission [gCO2e/MJ]	CO2e [tCO2e/a]
8.000	GTL	36,1	94,30	27,23
Kraftstoffverbrauch [l/a]	Kraftstoff	Faktor THG-Emission [kg/l]		CO2e [tCO2e/a]
543.922	Marine Diesel	3,53		1.920,04
82.702	Marine Gas Oil	3,49		288,63
Summe	2.235,90			

Tabelle 40: CO₂e-Emissionen der wasserseitigen Logistik durch den Einsatz von grünem Methanol

Kraftstoffbedarf [l/a]	Kraftstoff	Heizwert [MJ/l]	Faktor THG-Emission [gCO ₂ e/MJ]	CO ₂ e [tCO ₂ e/a]
1.586.560	Methanol	15,8	3,88	97,26

5.3.4 Ermittlung der Investitionskosten für den Einsatz von Methanol als Treibstoff im Schiffsverkehr der Stadt Brake

Im Rahmen dieses Unterkapitels wird sich lediglich auf die Investitionskosten für die Anschaffung der unterschiedlichen Schiffstypen bezogen. In Tabelle 41 sind sowohl

tatsächlich entstandene Kosten von umgesetzten Projekten als auch geschätzte Kosten von geplanten Projekten und Fallstudien enthalten.

Tabelle 41: Umbau -und Neubaukosten verschiedener Schiffstypen

Schiffstyp	Quelle	R/N*	Kosten
Kreuzfahrtschiff	Stena Germanica, 23.000 kW ⁹⁵	R	22 Mio. € (davon 13 Mio. € Umrüstung/ 9 Mio. € Onshore Ausbau)
Kabelleger	Nexus, 10.948 kW ⁹⁶	R	10 Mio. €
Stückgutfrachter	Wagenborg, 4500 kW ⁹⁷	R	3,8 Mio. €
Ro-Ro Fähre	Ellis und Tanneberger ⁹⁸	R	6,4 Mio. €
	Ellis und Tanneberger ⁹⁹	N	13,5 Mio. €
Chemietanker	Ellis und Tanneberger ¹⁰⁰	R	3,2 Mio. €
	Ellis und Tanneberger ¹⁰¹	N	6,8 Mio. €
Kreuzfahrtschiff	Ellis und Tanneberger ¹⁰²	R	7 Mio. €
	Ellis und Tanneberger ¹⁰³	N	15,2 Mio. €
Forschungsschiff	Uthörn ¹⁰⁴	N	14,45 Mio. €

* R: Anpassung (Retrofit) der existierenden Antriebssysteme und zugehörige Systeme

N: Neubau einschließlich Antriebe, Generatoren und elektrische Ausrüstung

Diese Angaben können als Orientierung dienen, jedoch besteht zusätzlich die Möglichkeit die Kosten an Hand der ursprünglichen Motorleistung des Schiffes anzugeben. Diesbezüglich ergeben sich Kosten von 350€/kW bis 913€/kW für verschiedene Leistungsklassen. Gemittelt ergibt sich ein Wert von 620€/kW, an dem sich für die folgenden Schätzungen orientiert wurde. Die Schätzungen beziehen sich auf einen Umbau der bereits bestehenden Schiffsmodelle. In Tabelle 42 ist eine Übersicht aller im Untersuchungsgebiet vorkommenden Leistungsklassen dargestellt. An Hand der Leistung der jeweiligen Schiffe ist eine Kostenangabe für eine mögliche Umrüstung auf Methanol-Betrieb angegeben. Somit ergeben sich Umrüstungspreise für die betrachteten Schiffe von 68.000 € bis 3,29 Mio. €.

⁹⁵ (116)

⁹⁶ (102 S. 50)

⁹⁷ (102 S. 65)

⁹⁸ (109 S. 50)

⁹⁹ (109 S. 50)

¹⁰⁰ (109 S. 50)

¹⁰¹ (109 S. 50)

¹⁰² (109 S. 50)

¹⁰³ (109 S. 50)

¹⁰⁴ (96)

Tabelle 42: Übersicht aller im Untersuchungsgebiet vorkommenden Schiffsleistungsklassen und daraus berechnete Umrüstungskosten.

Leistungsklasse	Leistungsangabe der Schiffe [kW]	Kostenschätzung [€]
NRMM (Non-road Mobile Machinery)	110	68.000
	115	71.300
	148	91.760
	200	124.000
	296	183.520
Klein	404	250.480
	900	558.000
	1200	744.000
Mittel	1500	930.000
	1600	992.000
	1860	1.153.200
	2000	1.240.000
	3165	1.962.300
Groß	4635	2.873.700
	5000	3.100.000
	5295	3.282.900
	5310	3.292.200

Die wichtigsten Kostenpunkte bei der Nach- oder Umrüstung von Schiffen werden durch Modifikationen des Motors, des Kraftstoffsystems an Bord und durch die zugehörigen Sicherheitssysteme widerspiegelt. Im Falle eines Neubaus würden diese Kostenpunkte weitaus komplexer und kostspieliger ausfallen. Die Kosten für einen Neubau lassen sich auf ca. 15,4 Mio. € kalkulieren. Diese Angaben variieren jedoch stark abhängig von dem betrachteten Schiffstyp, der Schiffsgröße und Leistung. Im Bereich des Offshore Shippings werden die Kosten für eine Nachrüstung auf Methanol-Betrieb in eine gleiche Größenordnung wie diese der Nachrüstungen von Abgaswäsche-Technologien oder weiteren Abgasnachbehandlungen für Schweröl eingeordnet.¹⁰⁵ Auch wenn Abgaswäsche- und Filter-Technologien kurzfristig zu der Reduktion von THG-Emissionen beitragen, wird dadurch nur die Schiffsemission gesäubert, nicht aber die Produktion von nachhaltigen Treibstoffen gefördert. Somit erscheint die Investition zur Nachrüstung auf Methanol-Betrieb weitaus zukunftsorientierter.

5.3.5 Ermittlung der laufenden Kosten für den Einsatz von Methanol als Treibstoff im Schiffsverkehr der Stadt Brake

Um den Betrieb der Methanol-Schiffe aufrecht erhalten zu können, fallen auf der einen Seite die Treibstoffkosten und auf der anderen Seite Kosten für die Wartung- und Instandhaltung an.

¹⁰⁵ (101 S. 5)

Die Treibstoffkosten setzen sich aus unterschiedlichen Aspekten zusammen, die die Höhe der laufenden Kosten stark prägen. Diesbezüglich spielt einerseits der Herstellungsort des Methanols eine Rolle. Wird die Methanol-Synthese in Brake selbst, gekoppelt an die geplante Wasserstoffinfrastruktur, vollzogen, entfallen die Kosten für den Transport und eine gewisse Unabhängigkeit von externen Anbietern wird ermöglicht. In den letzten 10 Jahren variierte der Preis für eine Tonne Methanol zwischen 250€ und 400€. Der Markt ist insgesamt durch viele verschiedene Marktteilnehmer und einen starken globalen Wettbewerb geprägt. Zudem tragen saisonale Schwankungen, Wartungsarbeiten, Ausfälle, sowie Erdöl- und Erdgaspreise zu Schwankungen der Produktionsmenge und des Absatzes bei. Dies beeinflusst demzufolge die Preisbildung für eine Tonne Methanol. Die unterschiedlichen Herstellungsmöglichkeiten von Methanol, ergeben ebenfalls Abweichungen in dem Preis pro Tonne. In Tabelle 43 wird dargestellt, mit welchen Preisen für eine Tonne Methanol in Abhängigkeit der Produktion zu rechnen ist.

Tabelle 43: Übersicht der Produktionskosten von Methanol (Daten nach Bos, Kersten & Brillman ¹⁰⁶)

Basis		Kohlenstoff	Kosten(€/t)
Fossil	Synthesegas	Reformierung von Erdgas	200
		Vergasung von Kohle	250
Biomasse		Vergasung von Waldreststoff	600
		Reformierung von Glycerin	500
Elektrolyse	CO ₂	Abgeschiedenes CO ₂ (außerhalb Scope)	610 - 1450
		CO ₂ -Rauchgasabscheidung durch Kalziumkarbonat	1400
		CO ₂ (Input)	900
		CO ₂ -Luftabscheidung durch feste Amine	800

Aus Tabelle 43 wird ersichtlich, dass die Kosten der Methanol-Produktion basierend auf

¹⁰⁶ (107 S. 3)

Elektrolyse weitaus höher ausfallen. Dennoch kann die Herstellung von Wasserstoff durch überschüssigen Strom die Kostenbilanz zukünftig verbessern. Mit der fortschreitenden Entwicklung von Wasserstoffproduktionstechnologien, direkter Luftabscheidung und zunehmender Verfügbarkeit kostengünstigen erneuerbaren Stroms wird die Herstellung von Methanol aus Luft, Wasser und erneuerbarem Strom immer wettbewerbsfähiger. Darüber hinaus werden durch den Anstieg der CO₂-Steuer von 50 USD/t CO₂ (rund 42€/t) die Produktionskosten von erneuerbarem Methanol bis zu 80 USD/t (rund 67 €/t) sinken.¹⁰⁷

Da im Rahmen des Projektes H2BakeCO₂ der Fokus auf der Nutzung von grünem Methanol liegt, ist mit durchschnittlichen Kosten von ca. 1.000 € pro Tonne Methanol mit sinkendem Trend zu rechnen. Der Import von Methanol sollte in Brake nur eine kurzfristige Lösung darstellen, die durch die eigene Methanol-Produktion vor Ort zeitnah abgelöst werden sollte. So ergeben sich weitere Standort bezogene Preisvorteile.

Wird beispielhaft eines der in Brake eingesetzten Peilboote mit den in Tabelle 44 angegebenen Verbräuchen mit grünem Methanol betrieben, ergeben sich durchschnittliche jährliche Treibstoffkosten von ca. 5.856 €.

Tabelle 44: Darstellung von möglicher jährlicher Treibstoffkosten für grünes Methanol an dem Beispiel "Peilboot"

Schiffstyp	Methanol-Verbrauch [kg/a]	Nachrüstung [€]	Treibstoffkosten [€/a]
Peilboot	5.856	ca. 68.000	ca. 5.856

Zusätzlich zu den Treibstoffkosten fallen Wartungs- und Instandhaltungskosten an. Allgemein lässt sich ein grober Richtwert von 2 bis 4% des Kaufpreises pro Jahr nennen. Jedoch besteht für die Durchführung der Wartung die Notwendigkeit ortsansässiger Expertise.

5.3.6 Implementierung der Methanol-Herstellung in die bestehende Wasserstoff-Infrastruktur

Auf Grund der geplanten Wasserstoff-Infrastruktur im Untersuchungsgebiet, erweist sich die eigene Herstellung von Methanol vor Ort als sehr sinnvoll. Daraus ergeben sich sowohl preisliche und infrastrukturelle Vorteile, sowie marktwirtschaftliche und politische Unabhängigkeit. Um die nötige Infrastruktur der Methanol-Herstellung aufzuzeigen, wird in den folgenden Unterkapiteln die technische Umsetzung, der In- und Output des

¹⁰⁷ (108 S. 6)

Produktionskreislaufes und die Verteilung, sowie die Speicherung von Methanol in Abhängigkeit zu den Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes H2BrakeCO2 betrachtet. Bei den betrachteten Prozessen handelt es sich ausschließlich um die Herstellung von „grünem“ Methanol.

5.3.6.1 Technische Umsetzung der Methanol-Herstellung

Herkömmlich wird Methanol auf Basis unterschiedlicher Verfahren unter verschiedenen Temperaturen, Drücken und Katalysatoren hergestellt. Diese werden über den Reaktionsdruck unterschieden. Die Verfahren der Methanol-Herstellung können in Hoch-, Mittel- und Niederdruckverfahren klassifiziert werden.¹⁰⁸ Das klassische Verfahren ist die Hochdruck-Methanol-Synthese mit einem Chrom-Zink- Katalysator ¹⁰⁹. Aktuell angewandte Prozesse nutzen vermehrt die Niederdruck-Methanol-Synthese mit einem Kupfer-Zinkoxid-Aluminiumoxid- Katalysator. Die Katalysatoren können sich in Aufbau und Anordnung unterscheiden ¹¹⁰. Verwendete Rohstoffe sind Synthesegase wie CO₂/H₂ oder CO/H₂ aus Kohlevergasung, Erdgas, Benzin, Rückstandsölen der Erdölaufbereitung oder Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Außerdem wird in der Literatur auf weitere Methoden der Methanol-Herstellung aus Kohle oder Methan verwiesen.¹¹¹

Im Rahmen der Studie wird der Fokus sowohl auf CO₂-Emissionseinsparung gesetzt, als auch auf eine effiziente Umsetzung des Wertschöpfungskreislaufes von Wasserstoff. Somit ergeben sich zwei Möglichkeiten einer nachhaltigen Methanol-Herstellung. Auf der einen Seite könnte durch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre oder aus Industrieprozessen die benötigte Kohlenstoffdioxidmenge zu dem nachhaltig hergestellten Wasserstoff hinzugeführt werden. Auf der anderen Seite könnte über die Gewinnung von Biogas durch Biomüll oder die Gewinnung von Synthesegas durch Biomasse Methanol produziert werden. Dies erlangt insofern Relevanz, als dass der Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband eine Kläranlage in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebiet betreibt, die Klärschlamm als Biomasse zur Verfügung stellt.

Die maßgeblichen Schritte der Methanol-Herstellung setzen sich wie folgt zusammen:

- Erzeugung von Synthesegas
- Umwandlung von Synthesegas in Rohmethanol
- Destillation des Rohmethanols (um gewünschten Reinheitsgrad zu erhalten)

¹⁰⁸ (118 S. 12)

¹⁰⁹ (95 S. 34)

¹¹⁰ (119 S. 238)

¹¹¹ (119) (103)

Gewöhnlich wird über Erdölreformierung Synthesegas gewonnen. Wird jedoch der technische Prozess durch einen adiabatischen Reaktor erweitert, wie in Abbildung 41, kann eine gewöhnliche Syntheseanlage mit Wasserstoff und CO₂ statt Synthesegas betrieben werden.

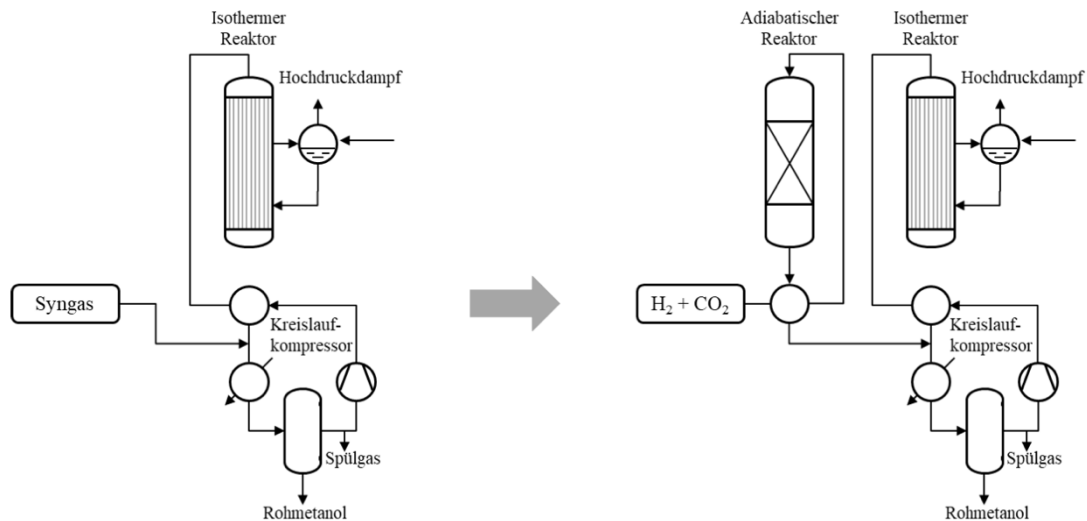


Abbildung 41: Umrüstung eines Synthesegaskonverters durch einen adiabatischen Reaktor¹¹²

5.3.6.2 In- und Output des Produktionskreislaufes von Methanol

Es ergeben sich zwei nachhaltige Produktionskreisläufe, die für die Methanol-Herstellung im Untersuchungsgebiet H2BrakeCO₂ zu betrachten sind. In Abbildung 42 ist das Fließbild der wesentlichen Schritte der Herstellung von Methanol aus Biomasse dargestellt und in Abbildung 43 das Fließbild der Herstellung basierend auf erneuerbaren Energien.

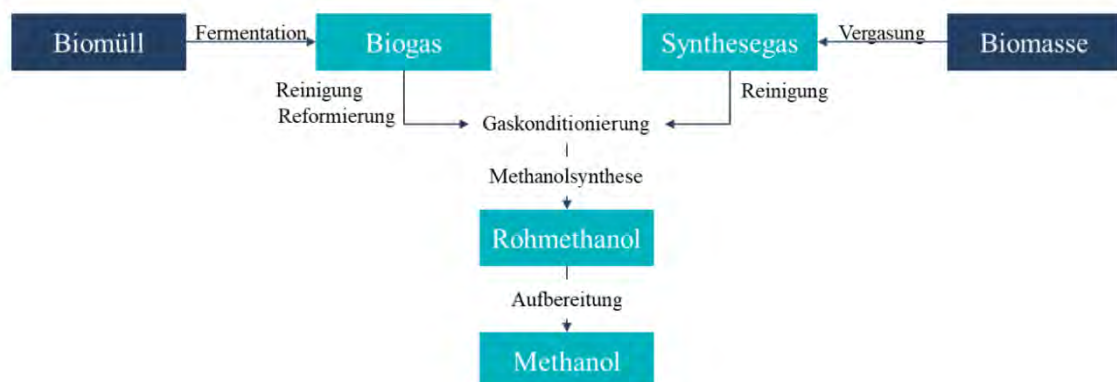


Abbildung 42: Fließbild der wesentlichen Schritte der Methanol-Produktion aus Biomasse¹¹³

¹¹² (110)

¹¹³ (110)

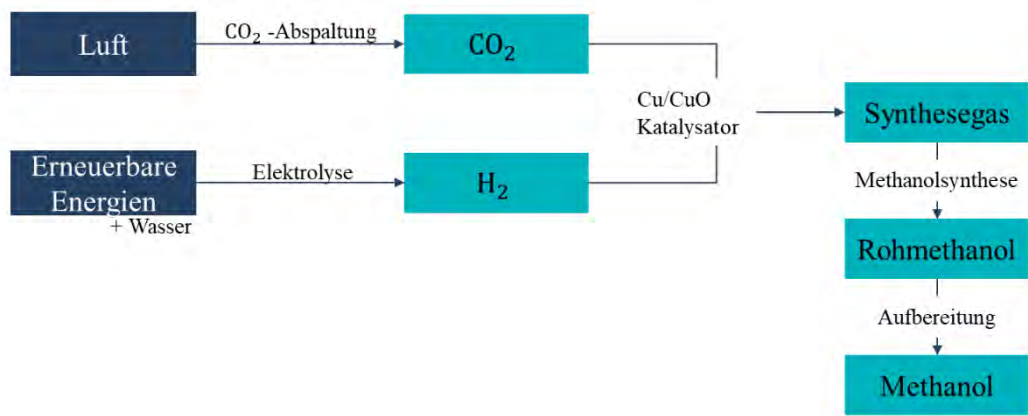


Abbildung 43: Fließbild der wesentlichen Schritte der Methanol-Produktion aus erneuerbaren Energien ¹¹⁴

Für das Untersuchungsgebiet wird eine Zusammenführung beider Fließbilder empfohlen, die letztendlich eine dezentrale Power-To-Methanol-Anlage darstellt (siehe Abbildung 44).

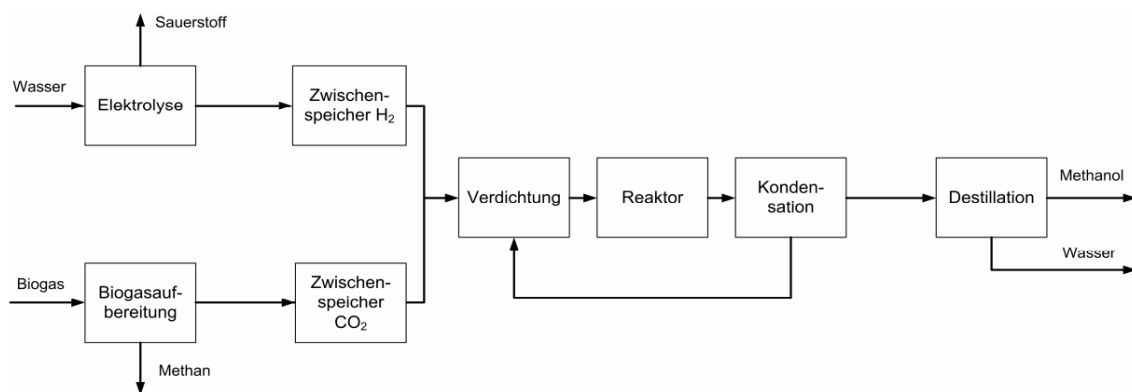


Abbildung 44: Dezentrale Power-To-Methanol-Anlage ¹¹⁵

Der In- und Output der Power-To-Methanol-Anlage ist von vielen Faktoren abhängig. In einer Studie der Technischen Universität Graz wurde eine Anlage mit einer Jahresproduktion von 1.300 t Methanol energetisch und wirtschaftlich betrachtet. Der berechnete Methanol-Bedarf des Untersuchungsgebiet ergibt 1.253,4 t Methanol. Somit liegt das Anwendungsbeispiel in einer ähnlichen Größenordnung und lässt sich gut als Orientierung nutzen. Um 1.300 t Methanol herstellen zu können wird von einem Verbrauch von 15 GWh¹¹⁶ elektrischer Energie ausgegangen. Diese Angabe beinhaltet die gesamte Prozessbetrachtung inklusive Elektrolyse. In Tabelle 45 ist der In- und Output der Anlage pro Stunde dargestellt. Da die Auslegung der Elektrolyse im Rahmen dieses Projektes gesondert betrachtet wird, spielt hier lediglich der In- und Output der Methanol-Synthese eine Rolle.

¹¹⁴ (110)

¹¹⁵ (117)

¹¹⁶ (117), S. 9

Tabelle 45: In- und Output einer Power-to-Methanol-Anlage mit einem jährlichen Methanol-Output von 1300 t ohne Betrachtung des Elektrolyseverfahrens ¹¹⁷

Input	Mengenangabe	Output	Mengenangabe
H ₂	33 kg/h	Methanol	178 kg/h
CO ₂	245 kg/h	Wasser	100 kg/h
Biogas	250 m ³ /h		

Beispielsweise könnten aus 100 t flüssigem Klärschlamm eine tägliche Menge von 1500 m³ Biogas gewonnen werden. Bei einem Tagesbetrieb von 20 h, könnten durch 100 t Klärschlamm 6 Stunden des täglichen Bedarfs abgedeckt werden.

5.3.6.3 Speicherung und Verteilung von Methanol

Bezüglich der Verteilung und Speicherung von Methanol kommt die IMO zu dem Ergebnis, dass die Technologie von Bunkersystemen für Methanol ausgereift ist. Weiterhin ist die Technologie zur Lagerung von Methanol fortgeschritten.¹¹⁸ In einer Machbarkeitsstudie wurde dargelegt, dass die gegenwärtige Bunkerinfrastruktur ausschließlich geringfügige Änderungen für die Handhabung mit Methanol erfordert.¹¹⁹ Auch wenn die Menge an Methanol, die jährlich produziert wird, sehr groß ist, gibt es bisher wenige Methanol- Bunkereinrichtungen für Schiffe.

Das Bunkern von Schiffen kann sowohl von Schiffen als auch von Land aus erfolgen, und für beide Lösungen werden Terminals benötigt, die Treibstoff bereitstellen. Prinzipiell ist für das Bunkern von Methanol die gleiche Alternative wie bei LNG denkbar (siehe Abbildung 45). Dazu gehören die landseitige Bebunkerung durch Tank-LKW zu Schiff (TtS), Terminal zu Schiff (PtS) und Tank-Container auf Schiff (ToS). Wasserseitig erfolgt die Übergabe von Kraftstoffen über Schiff zu Schiff (StS). Bei TsS, PtS und StS wird der Transfer über ein Rohrleitungssystem durchgeführt. Die Übergabe bei ToS erfolgt über einen Ladungsträger, der auf das Schiff transportiert und angeschlossen wird und als Tank verbleibt.¹²⁰

¹¹⁷ (117)

¹¹⁸ (115 S. 30)

¹¹⁹ (105 S. 34)

¹²⁰ (97)

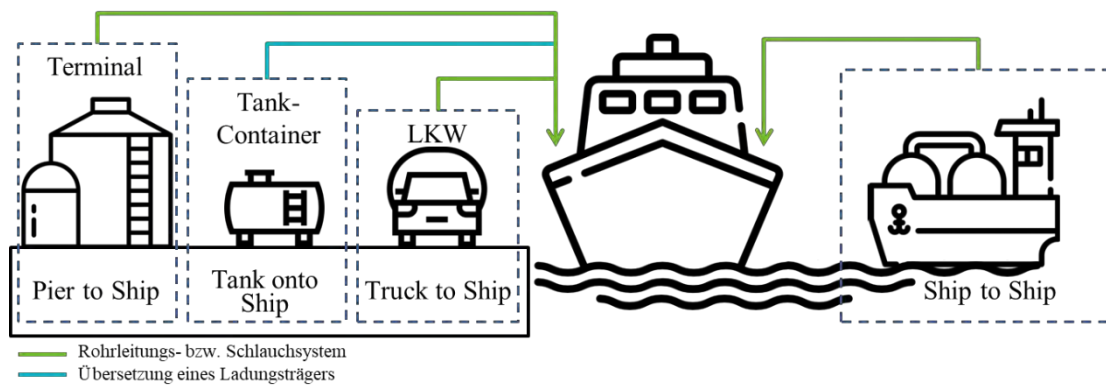


Abbildung 45: Betankungsmöglichkeiten für Methanol ¹²¹

Die mit Methanol betriebenen Schiffe werden üblicherweise von Lastwagen gebunkert. Beispielsweise für die Umrüstung der Stena Germanica wurde am Hafen Göteborg in Schweden eine landseitige Bunkeranlage konzipiert. Diese enthält eine Methanolkumpe die das Methanol aus LKWs in den Schiffstank transportiert. Zusätzlich ist die Anlage mit einem integrierten Brandbekämpfungssystem und einer Schutzschwelle (Süllrand) ausgestattet, um im Fall einer Leckage ein Ausbreiten des flüssigen Methanols zu verhindern.¹²²

In Rotterdam wurde im Mai 2021 das Tankschiff „Takaroa Sun“ (Waterfront Shipping) von der Bunker-Barge „MTS Evidence“ erstmals auf Wasserseite mit Methanol versorgt. Dadurch wurde demonstriert, dass das Bunkern von Methanol bei der Beachtung von Sicherheitsstandards ähnlich wie bei konventionellen Kraftstoffen erfolgt und sicher durchgeführt werden kann.¹²³

Außerdem gilt, dass Fahrzeuge mit Methanol als Ladung mit einem Flammpunkt unter 55 °C innerhalb von Tankhäfen oder zugelassenen Liegeplätzen stehen dürfen. In Deutschland wird eine Genehmigung¹²⁴ für Bunkervorgänge vorausgesetzt. Hierfür ist eine Risikoanalyse vorzulegen.

Für die Lagerung an Bord eines Schiffs darf Methanol in herkömmlichen Kraftstofftanks gelagert werden. In vielen Studien wird der Lagerort unterhalb der Wasserlinie vorgeschlagen, da Methanol von der Außenhaut des Schiffes begrenzt werden darf, wenn es sich unterhalb der niedrigsten möglichen Wasserlinie befindet. Bei einer Umrüstung besteht die Möglichkeit Ballasttanks als potentielle Kraftstofftanks zu nutzen. Es ist zu beachten, dass diese Tanks

¹²¹ (110 S. 54)

¹²² (100 S. 28)

¹²³ (121)

¹²⁴ BImSchG Paragraph 4

spezielle Beschichtungen als Korrosionsschutz (z.B. Zink) und Sicherheitsvorkehrungen erfordern.¹²⁵

5.3.6.4 *Kostengestaltung der Methanol-Infrastruktur*

Die Infrastrukturkosten sind im Vergleich zu möglichen Alternativlösungen überschaubar. Ein Bunkerschiff kann für schätzungsweise 1,5 Mio. € umgebaut werden. Die Installation einer kleinen Bunkeranlage für Methanol wird auf ca. 400.000 € geschätzt. Für die Installation eines Methanoltanks in der Größe von 20.000 m³ Methanol und die Vorrichtung zum Beladen des Tanks von einem Tankschiff und der Entladung auf ein Bunkerschiff liegen die Kosten bei ca. 5 Mio. €. Im Gegensatz dazu kostet ein LNG-Terminal etwa 50 Mio. € und ein LNG-Bunkerschiff 30 Mio. € (Stand 2015).¹²⁶

5.4 Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung für die Landstromversorgung in der Stadt Brake

Mit Landstrom wird in See- und Binnenhäfen und auch an Anlegestellen für Kleinstschiffe der elektrische Strom bezeichnet, der zur Nutzung auf Schiffen verschiedenster Typen und Größen während der Liegezeiten in Häfen an Land bereitgestellt und zum Betrieb der elektrischen Verbraucher an Bord der Schiffe zur Aufrechterhaltung folgender Aktivitäten per Kabelverbindung von der Landseite an Bord übernommen und genutzt werden kann, wenn die technischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Voraussetzungen dazu gegeben sind:

- Hotelbetrieb
- Kommunikation
- Beleuchtung
- Aufrechterhaltung maschinentechnischer Maßnahmen (Pumpleistungen, Kraftstoff-Vorwärmung, Förderung von Schmiermitteln, Kühlung, etc.)
- Betrieb von Materialfördersystemen, Belade-/Entladesysteme
- Für Kleinschiffe (Segelboote, Barkassen, etc.) der Betrieb von Kleinstverbrauchern an Bord

Mit **Landstrom** oder besser ausgedrückt mit **Landstromnutzung** wird demgemäß auch das folgende Konzept bezeichnet, welches in diesem Kapitel Gegenstand der Betrachtungen ist:

Weltweit sind ca. 90.000 Frachtschiffe unterwegs. Seeschiffe transportieren rund 90 Prozent des weltweiten Warenverkehrs. Etwa 90 Prozent des EU-Außenhandels und über 40 Prozent

¹²⁵ (98 S. 13)

¹²⁶ (105 S. 33)

des EU-Binnenhandels erfolgen auf dem Seeweg. Weltweit betrachtet liegt bei etwa einem Drittel der Schiffsbewegungen der Ziel- oder Abfahrtshafen in der EU. Nord- und Ostsee gehören zu den am häufigsten und dichtesten befahrenen Meeren der Welt.¹²⁷

Die meisten Schiffe betreiben oder nutzen ihre mit Schweröl (HFO, heavy fuel oil) betriebenen Hauptmaschinen oder Nebenmaschinen während der Liegezeiten im Hafen weiter, um die Bordstromversorgung während der Liegezeiten sicherzustellen.

Der immer noch weitgehend übliche Betrieb der diesel-elektrischen Stromerzeugungsanlagen während der Liegezeiten ist begleitet von der Erzeugung klimaschädlicher Treibhausgase (THG) und Luftschadstoffen durch die Antriebe mit fossilen Brennstoffen (vorwiegend Schweröl und/oder Marinediesel).

Wenn während der **Liegezeiten** der Schiffe im Hafen die bordeigenen und in der Regel diesel-elektrisch betriebenen Stromerzeugungsanlagen nicht genutzt werden, sondern der zuvor beschriebene Landstrom eingesetzt wird, soweit dieser einschließlich der dafür notwendigen Infrastrukturen zur Verfügung steht, so handelt es sich um **Landstromnutzung** mit allen seinen möglichen positiven Auswirkungen für Klima und Umwelt.

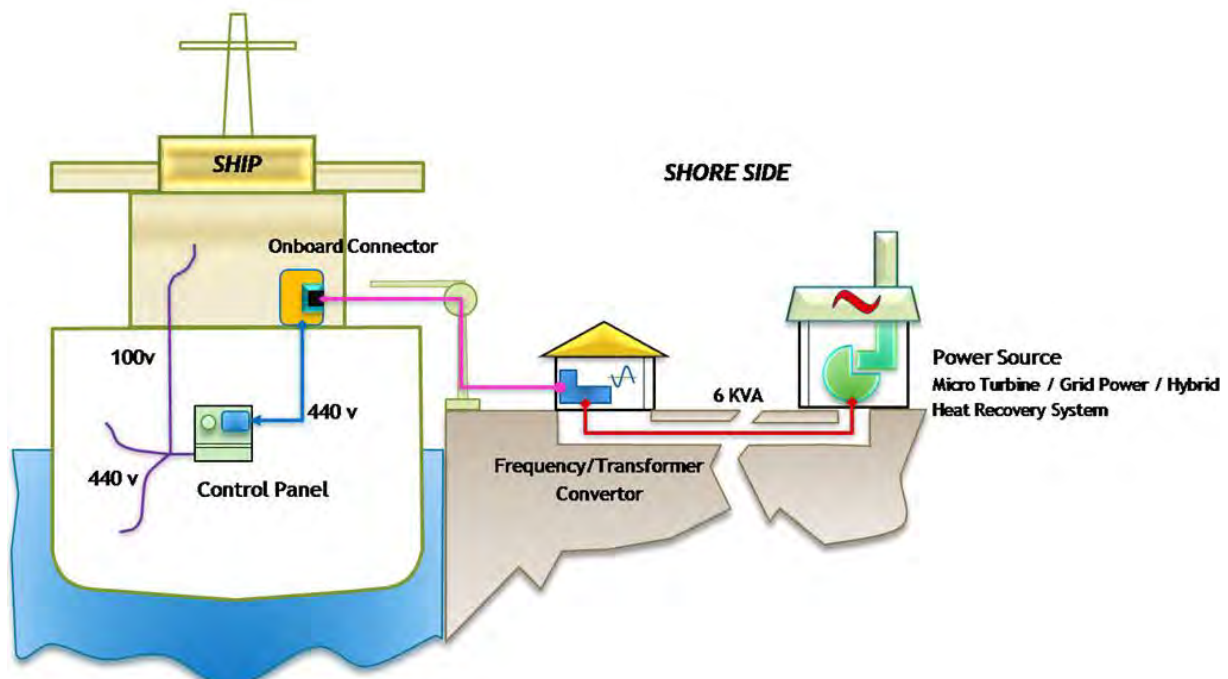


Abbildung 46: Prinzip der Landstromversorgung¹²⁸

Der Einsatz von klimaneutralem Landstrom ist einer der vielen möglichen klimarelevanten Bausteine weltweit mit beträchtlichem THG-Einsparungspotential, um die geplanten

¹²⁷ (28)

¹²⁸ (29)

Klimaziele bis 2045 mit sinnvollen Etappenzielen zu erreichen. Die Nutzung und der Einsatz von Landstrom haben zum jetzigen Zeitpunkt in Brake seitens des Betreibers NPorts jedoch keine übergeordnete Bedeutung.

- Landstrom wird in Brake an acht Entnahmestellen im Hafen angeboten. Die Nutzung erfolgt vorwiegend durch **Barkassen, Sportboote und kleinere Schiffe im Binnenhafen.**
- Die Stromabgabe erfolgt über festinstallierte Entnahmestellen. Die Stromabgabe kann individuell pro Verbraucher über den Abgabezeitraum gemessen werden und die Stromverbraucher können mit den angefallenen Kosten belastet werden.
- Einige der Entnahmestellen sind zur Abgabe von Baustrom eingerichtet und berechtigt und werden auch für diesen Zweck eingesetzt.
- **Abgabe von Landstrommengen über 8 Entnahmestellen in den Jahren 2018/2019:** 200.000 kWh bis 500.000 kWh; das entspricht in etwa dem Stromverbrauch von 70 Haushalten im Jahr (bei einer durchschnittlichen Verbrauchsmenge von ca. 3000 kWh pro Jahr und Haushalt)
- Das für die Hafeninfrastruktur tätige und verantwortliche Unternehmen stellt für die Aufrechterhaltung der Hafeninfrastruktur (Beleuchtung, Kommunikation, Reparaturen) grünen Strom aus Erneuerbaren zur Verfügung.
- Seeschiffe, Frachter, Binnenschiffe sind in der Regel nicht technisch ausgerüstet, um Landstrom im Hafen aus Versorgungseinrichtungen zu übernehmen
- Gleichmaßen fehlen im Hafen leistungsfähige Infrastrukturen, um für alle Schiffe Landstrom zur Übernahme während der Liegezeiten anzubieten.
- Die Gründe für nicht vorhandene Infrastrukturen zur Landstromnutzung im Hafen und auf den Schiffen und die fehlende Nachfrage durch die Schiffsbetreiber:
 - Kostengründe (Investitionen in Infrastrukturen im Hafen und auf den Schiffen wären nicht unerheblich)
 - Nachweislich sehr hohe Stromkosten in Deutschland (Faktor 3 – 10 im Vergleich zur Eigenerzeugung an Bord über diesel-elektrische Anlagen). Als Stromverbraucher im Hafen müssten Schiffsbetreiber auch die EEG-Umlage zahlen, welche für alle Stromverbraucher einen Pflichtkostenanteil darstellt. Es sind Überlegungen im Gange, diesen Kostenanteil für Landstromverbraucher zu streichen oder zu reduzieren.¹²⁹ Es bleibt abzuwarten, ob eine solche relativ überschaubare Kostenerleichterung das Landstromthema nachhaltig beleben könnte.

¹²⁹ (30)

- Fehlende gesetzliche Vorschriften, eine Landstrompflicht durch den Gesetzgeber existiert nicht. Das Thema ist weiterhin in der Diskussion.

Jedes Schiff, welches eine zeitlich begrenzte Liegezeit (in der Regel 2-3 Tage) im Hafen verbringt, benötigt während der Liegezeiten bestimmte Mengen an Strom zur Versorgung der Mannschaftsräume und anderer technischer Einrichtungen, welche mit Strom betrieben werden.

Außerdem werden nicht unerhebliche Mengen an Heizenergie zur Beheizung der Mannschaftsräume benötigt und gleichermaßen Energie zum Kühlen bei Aufenthalt in verschiedenen Klimazonen.

Schiffe sind in **verschiedenen Klimazonen** unterwegs und benötigen je nach Standort auch Energie zum Kühlen der Aufenthaltsräume (von 30 Grad auf 20 Grad), durchaus vergleichbar dem Heizwärmebedarf.

Eine grobe Abschätzung liefert ein Verhältnis von ca. 2:1 zwischen Heizwärmebedarf und Bedarf an elektrischer Energie für allgemeine Zwecke. Wegen der traditionell schlechten Wärmeisolierung auf Schiffen ist ein Wert von 3:1 oder 4: 1 wahrscheinlicher.

Wie bereits erwähnt, steht die Heizenergie auf Schiffen wegen der großen Abfallwärmemengen aus dem Betrieb von Verbrennungsmotoren kostenlos zur Verfügung (enthalten im Kühlwasser, in der Kühlluft, und Wärme aus Abgasen des Verbrennungsprozesse) und wird in sogenannten Abhitzekesseln bereitgestellt.

Eine Investition in aufwendige Isolierungsmaßnahmen ist deshalb wenig sinnvoll, was den Betrieb von Heizungen anbetrifft. Für den Betrieb von Klimaanlage (elektrisch betrieben) wären solche Isolierungsmaßnahmen durchaus sinnvoll, um die Kosten für die Vorhaltung des Komforts an Bord zu verringern.

Für die Betrachtungen der Landstromversorgung liegt es nahe, den nicht unbeträchtlichen Energieaufwand für die Beheizung der Aufenthaltsräume während der Liegezeiten nicht unberücksichtigt zu lassen, insbesondere, wenn der Energiebedarf für Heizzwecke den allgemeinen Energiebedarf für alle Stromverbraucher deutlich nachweisbar um ein Mehrfaches übersteigt.

Die wesentlichen Aufgabenstellungen dieses Kapitels sind folgende:

- Darstellung des Istzustandes der Landstromversorgung im Seehafen Brake und Maßnahmen zur Gestaltung einer CO₂-freien Landstromversorgung im Seehafen Brake

durch direkten Einsatz von grünem Strom und/oder ggf. durch Einsatz von grünem Wasserstoff, wenn die Umstände eine derartige Lösung nahelegen.

- Welche CO₂ Mengen lassen sich durch den gezielten Einsatz von CO₂-freiem Landstrom einsparen?
- Welche Rolle kann grüner Wasserstoff zur Erzeugung des Strombedarfs von Seeschiffen/Frachtschiffen/Binnenschiffen während der Liegezeiten im Seehafen Brake spielen?
- Welche Anpassung oder Neuerrichtung von technischen Infrastrukturen wären zur Bereitstellung der solchermaßen gekennzeichneten Energiemengen erforderlich?
- Welcher Landstrombedarf wird sich bei entsprechender Gesetzgebung mit allgemeiner Landstrompflicht in der fernen Zukunft ergeben.

5.4.1 Wasserstoffbedarf für die Landstromversorgung in der Stadt Brake

Das übergeordnete Konzept des Gesamtkonzepts lautet: THG-Einsparungspotential durch den Einsatz von grünem Wasserstoff.

Es stellt sich die Frage, ob ein Anlegevorgang eines Schiffes, bei welchem ein Schiff sich für mehrere Tage in einem stationären unbewegten Zustand befindet im engeren oder weiteren Sinne einem Mobilitätsvorgang zuzuordnen ist.

Wenn ein Hafen über ausreichende Strommengen zur Versorgung mit grünem Strom verfügt, dann entfällt in dieser Versorgungskette für solche Verbrauchsbereiche, welche ohnehin direkt über das öffentliche Stromnetz mit grüner Energie versorgt werden können, der Bedarf nach wasserstoffbasierten Lösungen, bzw. es sind nur solche Ausnahmesituation zu betrachten, welche eine wasserstoffbasierte Lösung nahelegen.

Wenn keine Möglichkeit besteht, für einen sogenannten Mobilitätsvorgang im Rahmen eines Logistikprozesses die Energieversorgung über eine direkte dauerhafte Kabelverbindung oder über ein Stromleitsystem (Oberleitungen für Elektro-Loks, Straßenbahnen) zum Stromnetz bereitzustellen, dann sind wasserstoffbasierte Lösungen in Betracht zu ziehen, wenn eine CO₂-Freiheit dieses Mobilitätsvorganges angestrebt wird oder wenn eine flexible Lösung gebraucht wird, die nicht liegeplatzgebunden sein soll.

Jeglicher Umwandlungsaufwand von grünem Strom in Wasserstoff und zurück in Strom wäre aus energetischen und wirtschaftlichen Betrachtungen wegen der zusätzlichen Umwandlungsverluste kontraproduktiv, wenn die Alternative einer direkten Nutzung von grünem Strom ohne den Umweg über Wasserstoff besteht.

Wasserstoff könnte nur dann in sinnvoller Weise bei der Bereitstellung von Landstrom zum Einsatz kommen und zu einer Verringerung der THG-Freisetzung beitragen:

- Wenn der Hafen nicht mit ausreichenden Mengen an grünem Strom versorgt werden kann oder wenn bedingt durch die fehlende Infrastruktur der an sich vorhandene grüne Strom nicht problemlos an alle Schiffsanlegestellen herangeführt werden kann
- Wenn Anzahl und Einsatzort der Landstromversorgungseinheiten flexibel gehalten werden sollen, um nicht alle Liegeplätze mit entsprechenden Einrichtungen ausstatten zu müssen.
- Wenn die Aufstockung des zurzeit nur ca. 50% grünen Stromes aus den öffentlichen Netzen auf 100% aus guten Gründen als sinnvoll erachtet wird.

5.4.2 THG-Einsparpotential durch Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Landstromversorgung in der Stadt Brake

Um die THG-Freisetzungen während der Liegezeiten der Schiffe zu erfassen, bieten sich verschiedenen Vorgehensweisen an (klassische Verbrauchsmessungen und Messtechnik):

1. Erfassung der tagesgenauen Treibstoffverbräuche (Füllstandsmessungen) aus den mit Marine-Diesel befüllten Tagestanks, welche zur Versorgung der diesel-elektrischen Generatoren herangezogen werden. Daraus erfolgt die Umrechnung der Treibstoffmengen in die begleitenden freigesetzten THG-Mengen.
2. Direkte Messung der Strommengen über Stromzähler an den Generatoren. Umrechnung der notwendigen Primärenergie zum Betrieb der Generatoren unter der Annahme der eingesetzten Brennstoffqualitäten und Berücksichtigung von Wirkungsgraden (Verlusten) im Erzeugungsprozess. Umrechnung der dokumentierten erzeugten/verbrauchten Mengen an Diesel-Kraftstoff in CO₂e.

Die angestrebte detaillierte schiffsgenaue Erfassung der THG-Freisetzung aller Schiffe während der Liegezeiten im Hafen Brake war zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Kapitels Berichtserfassung aus den folgenden Gründen nicht möglich:

1. Die zuvor angedeuteten Messeinrichtungen mit den erforderlichen Dokumentationsverfahren sind entweder nicht existent oder nicht im Einsatz
2. Es handelt sich um schiffsinterne Daten/Messungen für Spezialzwecke, welche den Betreibern dienen und nicht an Dritte weitergegeben und auch zurzeit nicht von Dritten angefordert/registriert werden.

3. Es wurde bisher kein Standardverfahren etabliert, welches die beschriebenen Verbrauchsmengen als verbindliche Aufgabe der Schiffsführung tagesgenau erfasst und unter Einhaltung von Datenschutzbestimmungen an maritime und/oder staatliche Stellen zur Weiterverwendung weiterleitet.

Grundsätzlich mangelt es an aktuellen und verfügbaren Daten zum Stromverbrauch und zum direkten THG-Ausstoß von Schiffen während der Liegezeiten in deutschen Häfen. Für eine Abschätzung der THG-Emissionen, welche durch den Bezug von Landstrom theoretisch vermeidbar wären, ist eine verlässliche Abschätzung des Stromverbrauchs und des damit einhergehenden Brennstoffverbrauchs und der diesbezüglichen THG-Emissionen von Schiffen in deutschen Häfen notwendig.

Eine globale Abschätzung liefert eine Studie der OECD, in der für das Jahr 2011 Schiffsemissionen in Häfen weltweit in Höhe von 18 Mio. t CO₂e ermittelt wurden. Laut OECD entspricht dies rund 2 % der gesamten Emissionen aus dem Schiffsverkehr. 85 % dieser Emissionen entfallen auf Containerschiffe und Tanker.¹³⁰

Zur Unterstützung der Reduktion von THG-Emissionen ist am 1. März 2018 ein neues IMO-Datenerfassungssystem für den Kraftstoffverbrauch von Schiffen eingeführt worden. Dieses erhebt in einem ersten Schritt den Kraftstoffverbrauch aller erfassten Schiffe weltweit.¹³¹

Folgende Kenngrößen werden im Braker Hafen erfasst und standen für die Erstellung dieses Abschnitts zur Verfügung.¹³²

Betrachtungszeitraum: 2019

- Anzahl an Seeschiffseinläufen pro Jahr: 964
- Durchschnittliche Liegezeiten der Seeschiffe: 3 Tage
- Anzahl an Binnenschiffseinläufen pro Jahr: ca. 1518
- Durchschnittliche Liegezeiten der Binnenschiffe: 3 Tage

Individuelle Angaben pro Schiff:

- Schiffsname
- Einlaufdatum
- Auslaufdatum:
- Liegezeit [h]

¹³⁰ (31), S. 17 ff

¹³¹ (32)

¹³² (33)

- Schiffslänge [m]
- Antriebsleistungen der Hauptmaschine: unbekannt
- Antriebsleistungen der Generatoren: unbekannt
- Typische Tageslastkurve eines Hilfsdiesels (Antrieb der Generatoren): unbekannt
- Bruttoreaumzahl, BRZ – dimensionsloses Raummaß für die Größe von Schiffen

Aus den vorliegenden Daten sind die Dieserverbräuche und die damit verbundenen THG Freisetzungen nicht zu ermitteln.

Da zu den Treibhausgasemissionen aus der fossilen Deckung des Landstrombedarfs von Schiffen keine Informationen vorliegen, werden Schätzverfahren angewendet, um Anhaltspunkte für die THG-Freisetzungen im Braker Hafen aus diesen Prozessen zu gewinnen.

Hierzu werden die nachfolgend zitierten Daten aus einem Bericht des Öko-Instituts zum Bezug von Landstrom durch Schiffe herangezogen (Stand 2019).

Tabelle 46: Abgeschätzter jährlicher Stromverbrauch und THG-Emissionen durch Schiffe in deutschen Seehäfen¹³³

Schiffstyp	Abgeschätzter Hafen-Stromverbrauch in Deutschland (GWh/a)	Abgeschätzte Hafenemissionen in Deutschland (kt CO ₂ /a)	
		Marinediesel	Schweröl
Tanker	123	80	90
Trockengutfrachter	84	60	60
Containerschiffe	191	130	140
Frachtschiffe allgemein	678	470	490
Passagierschiffe	213	150	150
Kreuzfahrtschiffe	44	35	35
Gesamt	1.334	925	965

Durch Aufsummierung der THG-Emissionen aller Schiffstypen in allen deutschen Häfen ergibt sich ein maximales theoretisches Einsparpotential von lokalen THG-Emissionen durch einen 100% Landstrombezug in Höhe von 925 kt CO₂e, wenn der eingesetzte Dieselmotorkraftstoff zur Eigenstromerzeugung an Bord durch grünen Landstrom ersetzt würde.

Unter der Annahme, dass je nach Schiffstyp die Nutzung des Landstromes nur einen prozentualen Anteil dieser Schiffstypen betrifft verringert sich das THG-Einsparungspotential auf ca. 225 kt CO₂e. (Angenommene Erschließungsraten: 60 % bei Kreuzfahrtschiffen, 25 % bei Tankern, Trockengutfrachter, Frachtschiffen allgemein und Passagierschiffen und 5 % bei

¹³³ (34), S. 12

Containerschiffen.)¹³⁴ Die Erschließungsrate beschreibt die zugehörige prozentuale Angabe, auf wieviel Prozent der angegebenen Schiffe die beschriebene Verbrauchsangabe zutrifft. Beispiel: Die Angabe 25% für Tanker bedeutet, dass auf 25% aller erfassten Tanker die Angabe des Hafenstromverbrauchs in Höhe von 123 GWh/a anwendbar ist.¹³⁵

Eine Übertragung der THG-Freisetzung in deutschen Häfen während der Liegezeiten auf den Hafen Brake kann nun über folgende Methoden erfolgen:

Methode 1:

Abschätzung der THG-Freisetzung im Hafen Brake über die jährlichen Frachtmengen in Relation zu den Frachtmengen in der BRD. Annahme: Frachtmengen und THG-Mengen für verschiedene Häfen/Regionen stehen im gleichen Verhältnis.

- Gesamtgüterumschlag in deutschen Häfen: 304,7 Mio. Tonnen im Jahr 2018¹³⁶
 - Zugehöriger Hafenstromverbrauch in Deutschland (alle Schiffstypen): 1.344 GWh mit 925 kto THG-Ausstoß (Marineölverbrennung), bzw. 965 kto THG-Ausstoß (Schwerölverbrennung)
 - Zugehöriger Hafenstromverbrauch in Deutschland (nur Frachtschiffe und Trockengutfrachter): 762 GWh mit 530 kto THG-Ausstoß (Marineölverbrennung), bzw. 550 kto THG-Ausstoß (Schwerölverbrennung)
- Güterumschlag in Brake im Jahr 2018: 6,3 Mio. Tonnen¹³⁷

Verhältnis der Frachtmengen in Brake zu den gesamten Frachtmengen in der BRD: 2,07%.

Daraus würden sich für den Hafen der Stadt Brake ein Hafenstromverbrauch von **15,77 GWh ergeben.**

Die THG-Emission bei der Stromgewinnung durch Verbrennung von Mineralölprodukten beträgt ca. 0,87 kg/kWh.¹³⁸ Damit ergibt sich nach dieser Methode eine zugehörige Treibhausgasfreisetzung in Höhe von **13.719 t CO₂e**

Methode 2:

Abschätzung der THG-Freisetzung im Hafen Brake über die jährlichen Schiffsanläufe und Verrechnung mit der geschätzten THG-Freisetzung je Schiffsanlauf. Die dafür benötigten Werte sind für Frachtschiffe in Tabelle 47 aufgeführt. Hierbei handelt es sich in einer Abschätzung der strombedingten Emissionen je Hafenanfahrt in DE bei Annahme einer

¹³⁴ Vgl. (34), S. 12

¹³⁵ Vgl. (34), S. 12

¹³⁶ (35)

¹³⁷ (35)

¹³⁸ (76)

vollständigen Versorgung mit Landstrom (deutscher Durchschnittsmix; 2017 und Abschätzung für 2030)

- Jährliche Schiffsanläufe in Brake (Fracht-Schiffe): 964
- Jährliche Schiffsanläufe in Brake (Binnen-Schiffe): 1518

Da in Tabelle 47 für Binnenschiffe keine Informationen vorliegen wird überschlägig angenommen, dass die Frachtmengen der Binnenschiffe in Höhe von 1 Mio. t (siehe Tabelle 2) auf zusätzlichen Seeschiffen in den Seehafen gelangen. Bei einem Güterumschlag von 5705 t / Seeschiff (5,5 Mio. t / 964 Seeschiffe) würde dies ein zusätzliches Aufkommen von 176 Schiffen bedeuten. Die korrigierte Anzahl von Frachtschiffen wäre damit 1140.

Tabelle 47: Stromverbrauch je Hafenanfahrt in der BRD für Trockengutfrachter und Frachtschiffe allgemein¹³⁹

		Trockengutfrachter	Frachtschiffe allgemein
	Stromverbrauch je Hafenanfahrt (MWh)	27,4	9,2
Strommix im Jahr 2017	Strombedingte direkte Emissionen (t CO ₂ e)	13,2	4,4
Strommix im Jahr 2030	Strombedingte direkte Emissionen (t CO ₂ e)	8,2	2,7

Aus dem Stromverbrauch von 27,4 MWh je Hafenanfahrt pro Schiff und der angepassten Anzahl an Frachtschiffen ergibt sich ein jährlicher Strombedarf in Höhe von **31,24 GWh** und damit ca. die doppelte Menge des in Methode 1 ermittelten Strombedarfs. Verrechnet mit der THG-Emission bei der Stromgewinnung durch Verbrennung von Mineralölprodukten beträgt von 0,87 kg/kWh beträgt die THG-Emission nach dieser Methode **27.175,32 CO₂e**.

Die strombedingte THG-Freisetzung wird in Tabelle 47 mit **13,2 t CO₂e** pro Schiffsanlauf angegeben. Daraus würde sich eine gesamte THG-Freisetzung für alle im Hafen Brake anlegenden Schiffe von **15.048 t CO₂e** im Jahr 2019 ergeben. Dies entspricht ungefähr der Hälfte der zuvor ermittelten Treibhausgasemissionen die auf die Nutzung von

Landstromanschlüssen zurückzuführen wäre, was im Hinblick auf den derzeitigen deutschen

¹³⁹ Eigene Darstellung nach (34), S 14

Strommix realistisch einzustufen ist.

Die Diversität der Ergebnisse untermauert die eingangs festgestellte Herausforderung einer empirischen Ermittlung von THG-Emissionen aus der fossilen Landstromversorgung. Hier bleibt festzuhalten, dass auch die Ermittlung der zitierten Werte von 27,4 MWh beziehungsweise 13,2 Tonnen CO₂e pro Schiffsanlauf ebenfalls auf empirischem Weg erfolgt ist und mit einer Vielzahl von Unsicherheiten behaftet ist.

Nach den genutzten Methoden zur Ermittlung der direkten THG-Emissionen im Hafen der Stadt Brake, ausgelöst durch die Stromversorgung der Schiffe über eigene fossilbetriebene Aggregate, bewegt sich das THG-Einsparpotential in einem Bereich zwischen 13.719 t und 27.175,32 t CO₂e pro Jahr, wenn eine 100-prozentige Landstromversorgung für die Schifffahrt verpflichtend eingeführt werden würde.

Landstrom ist derzeit jedoch nicht prinzipiell CO₂-frei, die Bestrebungen zur verstärkten Nutzung von Landstrom, gehen aber eindeutig in Richtung der CO₂-Freiheit.

Die Versorgung von Schiffen mit klimafreundlichem Landstrom während der Liegezeiten entlastet im besten Fall die THG-Bilanz und verringert die Umweltverschmutzung in der unmittelbaren Hafenumgebung (Schadstoffvermeidung) und sorgt für eine bessere Luftqualität.

Alternativ besteht die Möglichkeit, ein mobiles Stromerzeugungsgerät (Beispiel: Brennstoffzelle gespeist aus Wasserstofftanks, Druckflaschen oder Rohrleitungen/Schläuchen) zur Erzeugung der elektrischen Energie als kompakte Einheit während der Liegezeit an Bord zu betreiben. So eine Stromerzeugungseinheit würde grünen Strom aus grünem Wasserstoff erzeugen, und den verbrauchten Strom während der Liegezeit vollständig CO₂-frei machen.

Diese mobile Einheit könnte sich auch im Bereich der Anlegestelle oder auf einer kleinen Barkasse befinden und über die erwähnten elektrischen Versorgungskabel die Stromversorgung übernehmen.

Wenn der Hafen über einen Anschluss zur Versorgung mit grünem Strom verfügt, so sollte (und könnte) die umweltfreundliche Stromversorgung als naheliegende Lösung auch direkt aus dem Stromnetz erfolgen.

In jedem Fall müsste das Schiff für einen Betrieb mit Landstrom ausgerüstet sein oder es müsste mit nicht unerheblichen Kosten umgerüstet werden. Gleichmaßen müsste der Hafen für die Bereitstellung von Landstrom ausgerüstet sein.

5.4.3 Umsetzungsplan für den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Landstromversorgung in der Stadt Brake

Der Hafeninfrastrukturbetreiber mit dem Land Niedersachsen als Eigentümer (verantwortlich für Administration & Finanzen) ist für folgende Bereiche/Aktivitäten zuständig.

- Werkstätten,
- Wartungsarbeiten,
- Instandsetzungsarbeiten,
- Neuerrichtung von Infrastruktur-Maßnahmen wie Verlegung von Rohrleitungen und Kabelkanälen und Kabelschächten zum Transport von Gasen, Flüssigkeiten, Strom,
- Lichtenanlagen,
- Fahrstühle,
- Signaleinrichtungen,
- Kommunikationseinrichtungen,
- Sicherheitstechnik,
- Gebäudebewachung,
- Personalräume,
- Aufzüge, Fahrstühle, Hebevorrichtungen
- Pumpen
- etc.

Alle übrigen Aktivitäten im Hafen (Be/Entladen, Lagerung, Abtransport) werden von den dafür zuständigen privaten Unternehmen betrieben, welche auch in Eigenregie die Versorgung mit Energie durch entsprechende Verträge mit Energieversorgern gestalten.

Zum Betrieb der Infrastruktur bezieht der Infrastrukturbetreiber 100% grünen Strom.

Die momentan noch relativ geringen angefragten und verbrauchten Landstrommengen werden aus diesem grünen Strom bereitgestellt.

Dieses Konzept hat sich wegen der geringen angefragten Landstrommengen historisch entwickelt. Grundsätzlich ist zu sagen, dass es nicht zum Kerngeschäft des Infrastrukturbetreibers gehört und auch nicht so betrachtet wird, Energiemengen jeglicher Art und Größenordnung zu vermarkten (Ankauf, Verkauf, Wettbewerb mit Anbietern, etc.).

Sollte der Landstrombedarf erwartungsgemäß durch gesetzliche Eingriffe in der Zukunft zunehmen, so sind die zugehörigen unternehmerischen Konzepte und Zuständigkeiten zu entwickeln einschließlich der Bereitstellung von erforderlichen neuen Infrastrukturen.

Zum jetzigen Zeitpunkt (März 2021) werden weiterhin acht Entnahmestellen in verschiedenen Hafenbereichen bereitgestellt (Seehafen und Binnenhafen).

Wie schon vorher ausgeführt wird der Einsatz von Wasserstoff dabei eine untergeordnete Rolle spielen, da ruhende Schiffe im Hafen aus öffentlichen Stromnetzen problemlos mit grünem Strom aus den öffentlichen Stromnetzen versorgt werden könnten.

In ca. 10 – 15 Jahren wird die Verfügbarkeit von grünem Strom im öffentlichen Versorgungsnetz erheblich zugenommen haben (Annahme ca. 75% Strommix (konventionell plus erneuerbar mit angenommen überproportionalen Steigerungsraten).

Landstromeinsatz wird in der eher langfristigen Zukunft (15 Jahre und mehr) definitiv eine Rolle spielen. Die Einführung (mit oder ohne Landstrompflicht) wird allmählich einsetzen, da nach einer weltweiten gesetzlichen Regelung noch lange Übergangsfristen bestehen werden.

Häfen sollten sich jedoch auf vereinzelte Anforderungen von Frachtschiffen nach Landstrom einstellen, deren Entsprechung dann Modellcharakter gewinnt.

Liegeplätze werden in Häfen nach Vorhandensein und Bedarf in sequentieller Reihenfolge zugewiesen und nicht zwingend nach dem Status quo zur Landstromversorgung am betreffenden Liegeplatz.

Aus diesem Grund wird folgende Empfehlung ausgesprochen:

Häfen sollten in der Zukunft mit ein oder zwei mobilen (nach Möglichkeit klimafreundlichen) Landstrom-Versorgungsgeräten ausgestattet sein, die nach Bedarf und ohne nennenswerte Verzögerung an der Einsatzstelle im Bereich des anfordernden Schiffes platziert werden können.

Hier sind wegen der typischen Schiffsgrößen (Maschinenleistung der Hauptmaschine ca. 2000 bis 4000 kW) in Brake und der extrapolierten Leistung für die Landstromversorgung mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen mit einer Leistung von 200-300 kW (ca. 10-15 % der Hauptmaschinenleistung) ins Auge zu fassen. Diese Annahmen müssten durch detaillierte Berechnungen und Simulationen im Detail bestätigt werden.

Diese Geräte müssten regelmäßig gewartet und betriebsbereit gehalten werden. Es ist davon auszugehen, dass sich in Häfen auch weitere Einsatzzwecke ergeben.

Die Betriebserfahrung mit dieser Technologie werden auf jeden Fall hilfreich sein, wenn der Landstrom vermehrt zum Einsatz gelangt. Auch sind solche Betriebserfahrungen auf andere Einsatzgebiete übertragbar, wo mobiler grüner Strom kurzfristig/mittelfristig zum Einsatz kommt.

5.5 Ausarbeitung der Wasserstoffanwendung in der Personenmobilität der Unternehmen der Stadt Brake

Auch wenn der Fokus der Studie auf den von dem Untersuchungsgebiet ausgehenden Logistik- und Hafenprozessen liegt, wurde der Sektor Personenmobilität ebenfalls auf sein Potential zur Anwendung von Wasserstofftechnologie geprüft. Dass Personenmobilität durch Wasserstofftechnologien umgesetzt werden kann, wird durch unterschiedlichste Pilotprojekte und bereits durch in Serie hergestellte Fahrzeugmodelle, wie beispielsweise den Toyota Mirai, bewiesen. Personenmobilität wird im Rahmen der Studie auf zwei unterschiedliche Weisen sichtbar. Auf der einen Seite wird durch an das Untersuchungsgebiet angrenzende Aktivitäten durch öffentliche Verkehrsmittel, wie Bus, Bahn und Fähre, als auch durch die privaten Anfahrtswege der Mitarbeiter:innen Mobilität relevant. Auf der anderen Seite durch unternehmensinterne Fahrten durch Dienstwagen. Somit trägt Personenmobilität zu dem Erhalt des Hafenbetriebes und der Logistikprozesse bei und stellt die Schnittstelle zwischen dem industriellen Charakter des Untersuchungsgebietes und dem städtischen Umfeld der Stadt Brake dar. Dennoch bietet sich besonders im PKW-Einsatz rein batterieelektrischen Elektromobilität als attraktive Alternative an. Welche der beiden Technologien sich innerhalb der unternehmensinternen Mobilität besser eignet, wird im Folgenden durch eine Potentialanalyse des Einsatzes von Wasserstofftechnologie basierend auf den projekt-intern erhobenen Daten durchgeführt. Des Weiteren werden zukunftsorientierte Umsetzungsmöglichkeiten dargestellt, die die Entwicklung hin zu einer CO₂-neutralen Mobilität der Logistikunternehmen der Stadt Brake ermöglichen können.

5.5.1 Potentialanalyse des Einsatzes von Wasserstofftechnologie in der Mobilität der Unternehmen zur Reduktion von THG-Emissionen

Aufbauend auf den erhobenen Fahrzeugdaten konnte festgestellt werden, dass sich im Falle des Untersuchungsgebietes Brake für den Sektor Personenmobilität der Einsatz von Wasserstofftechnologie nicht eignet. Die Abbildung 47 zeigt auf, wie durch eine einfache Gegenüberstellung von Brennstoffzellen- und Batteriebetrieb entschieden werden kann, welche Technologie mehr Potential darstellt. Die Datenerhebung der mobilen Aktivität der befragten Unternehmen hat in allen Fällen eine Unterschreitung der Mindestanforderung der durchschnittlichen Tageskilometer von 250 km ergeben. Somit wird bereits in der ersten Entscheidungsstufe, wie in Abbildung 47 erkenntlich, empfohlen von dem Einsatz eines Brennstoffzellenfahrzeuges abzusehen.

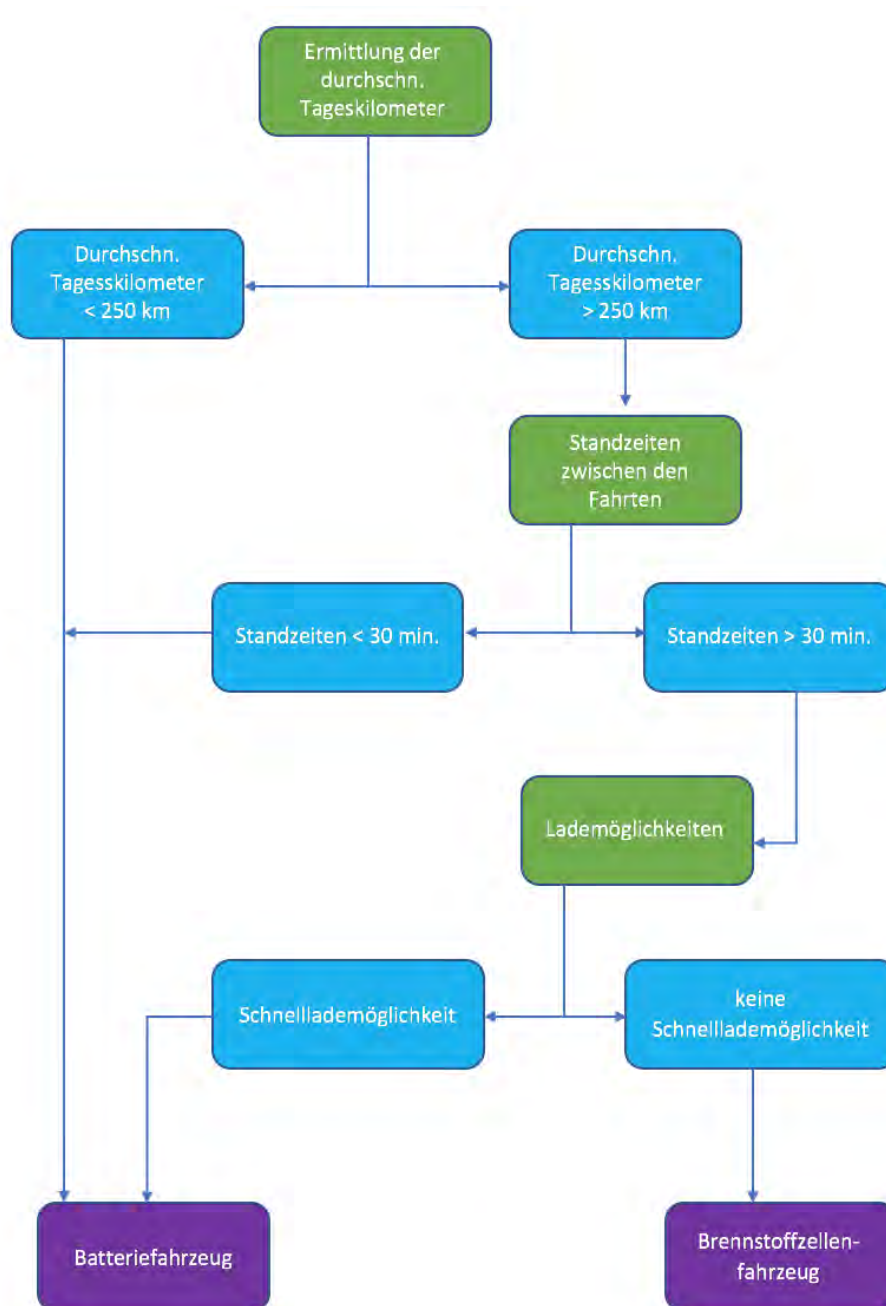


Abbildung 47: Gegenüberstellung des Einsatzes von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen in Form von Entscheidungsstufen

Dennoch sollte das Potential, Wasserstofftechnologie im Bereich der Personenmobilität in Form eines Anschauungsbeispiels einzusetzen, betrachtet werden. Die Ergänzung von Dienst-PKW-Flotten durch Brennstoffzellen-PKWs kann hinsichtlich der Mitarbeiter:innen zur Technologieakzeptanz und weiteren Sensibilisierung bezüglich des Klimawandels beitragen. Ebenso schafft der Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen im Bereich des ÖPNV gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber Wasserstofftechnologien und verschafft der Technologie und dem Thema Klimaneutralität öffentliche Aufmerksamkeit. Da im Bereich des ÖPNV weitaus längere durchschnittliche Tagesstrecken zurückgelegt werden und eine

Abhängigkeit von kurzen Tankzeiten besteht, die durch einen Brennstoffzellenbetrieb ermöglicht werden können, besteht hier ein Potential zur Anwendung von Wasserstofftechnologie, das in zukünftigen Studien betrachtet werden sollte. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass sich sowohl Oldenburg als auch Bremerhaven als an die Wesermarsch angrenzende Städte in der Beschaffung von Brennstoffzellen-Bussen für den ÖPNV-Ansatz befinden. Die existierende Busverbindung zwischen Oldenburg und Bremerhaven, die durch die Wesermarsch und Brake verläuft, würde sich explizit für die Brennstoffzellentechnologie anbieten und wäre hier gegenüber einer rein batterieelektrischen Lösung aufgrund der langen Strecke im Vorteil. Auch die von H2BrakeCO2 geplante Wasserstoff-Infrastruktur spricht für einen Umstieg des ÖPNV auf Wasserstoffantrieb.

5.5.2 Umsetzungsmöglichkeiten für eine CO2-neutrale Personenmobilität der Logistikunternehmen in der Stadt Brake

Die Reduktion von CO2 im Sektor Mobilität kann auf vielseitige Weise gestaltet werden. Die Verwendung eines betrieblichen Mobilitätsmanagements ermöglicht den Unternehmen die bisherigen Mobilitätsstrukturen nachhaltig zu verändern. In Abbildung 48 wird aufgezeigt aus welchen Maßnahmen sich das betriebliche Mobilitätsmanagement zusammen setzt.



Abbildung 48: Maßnahmen betrieblichen Mobilitätsmanagements ¹⁴⁰

Nicht nur der Austausch von fossil betriebenen Fahrzeugen durch nachhaltige Antriebe führt zu einer CO2-Reduktion, sondern auch eine Umstellung in dem Betrieb der

¹⁴⁰ (99 S. 5)

unternehmensinternen Fahrzeugflotten sowie die Umsetzung einer multimodalen Mobilität, die Nutzung des Umweltverbundes (Bus, Fahrrad, zu Fuß) intensiviert. Hierbei spielt die Digitalisierung eine prägende Rolle, die durch Vernetzung und Kommunikation eine effizientere und optimierte Fahrzeugnutzung und intermodale Mobilität ermöglicht. Diesbezüglich kann durch intelligenten Einsatz und Unterstützung von digitalen Technologien eine deutliche Verbesserung der betrieblichen CO₂-Bilanz im Bereich Mobilität erreicht werden.

5.6 Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffanwendung zum Erreichen einer Klimaneutralität der Hafen- und Straßengüterlogistik

In den vorausgegangenen Abschnitten dieses Gesamtkonzepts konnte bereits ein vielfältiger Ansatz für ein THG-Einsparpotential durch Anwendung der Wasserstofftechnologie in den unterschiedlichen Bereichen der Braker Logistik erarbeitet werden. An diversen Stellen konnte dieses Einsparpotential jedoch aufgrund der mangelnden Datenlage noch nicht mit entsprechenden Investitionssummen aus Seiten der Fahrzeuge gegenübergestellt werden. Die Anschaffungspreise, die herstellerseitig bereits für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge angedeutet werden, überschreiten selbst nach Abzug bestehender Förderzuschüsse die Anschaffungskosten konventionell betriebener Fahrzeuge stellenweise um das Doppelte. Das ist insbesondere dem Entwicklungsstand dieser Fahrzeugtechnologie und einer noch nicht hochgefahrenen Serienproduktion der Fahrzeuge geschuldet. Nach dem Übergang in die Serienproduktion ist eine signifikante Senkung der Anschaffungskosten der Fahrzeuge durch Skaleneffekte zu erwarten.

Der Betriebskostenvergleich lässt einen deutlich positiveres Zwischenfazit zu. Hier sind im Falle der LKW bereits ab einem Wasserstoffpreis von LKW **6,59 €/kg (brutto)** dieselben kraftstoffbedingten Betriebskosten wie bei einem Diesel-LKW zu erzielen.

Schwieriger stellt es sich hingegen dar, entsprechende Aussagen zu den wasserstoffbedingten Betriebskosten für die Umschlaggeräte zu treffen. Daher wird wiederholt auf die Notwendigkeit weiterer Machbarkeitsstudien und der testweisen Umrüstung von Fahrzeugen in diesem Bereich hingewiesen, auf Basis derer belastbare praxisnahe Daten und Informationen gewonnen werden können.

Als Beispiel ist hier das Projekt SH₂unter von bremenports GmbH & Co. KG zu nennen, bei dem die Konzeption einer H₂-Rangierlokomotive für den Hafenbetrieb gemeinsam mit Alstom vorgenommen wird. Ähnliche Projekte beispielsweise für schwere Flurförderfahrzeuge oder

Bagger sind auch in Brake in den Fokus gerückt und werden aufbauend auf dieses Konzept angestrebt.

Aus Sicht der Konzeptersteller ist der wichtigste Aspekt bei der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung eines Wasserstoffeinsatzes jedoch nicht bei den Investitions- und Betriebskosten der Fahrzeuge, sondern bei den Opportunitätskosten einer strikten Ablehnung klimaneutraler Fahrzeugalternativen auf Grund der als zu hoch empfundenen anfänglichen Kosten zu suchen. Das Umweltbundesamt hat in der Publikation „Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten“ den volkswirtschaftlichen Schaden durch die Emission von Treibhausgasen ermittelt und beziffert diesen auf 195 €/t CO₂e.¹⁴¹ Demnach verhindert die durch Wasserstoffanwendungen realisierbare THG-Einsparung von 27.196,68 t CO₂e im Untersuchungsgebiet einen jährlichen volkswirtschaftlichen Schaden in Höhe von 5,303 Mio. € per anno. Diese Summe wächst zum Jahr 2045 auf einen Betrag von 127,28 Mio. € per anno heran, der über die sukzessiv steigende CO₂-Steuer nach dem Verursacherprinzip an die Unternehmen weitergegeben wird.

Die Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels übersteigen sämtliche Kosten, die eine Maßnahme zu dessen Eindämmung veranschlagt. Jüngstes nationales Beispiel ist die Flutkatastrophe in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz in den Sommermonaten 2021 mit einem geschätzten Schaden in Höhe von 15 Mrd. €. Davon tragen Versicherer 5 Mrd. € und die übrigen 10 Mrd. € der Bund und die Länder.¹⁴² Derartige Extremwetterereignisse werden sich bedingt durch den anhaltenden Klimawandel häufen und daher keine Alternative zulassen, als vorerst höhere Anschaffungskosten für klimaneutrale Fahrzeuge und anfänglich höhere Betriebskosten zu akzeptieren bis sich das Preisniveau klimaneutraler Fahrzeuge dem der konventionellen Fahrzeuge gleicht. Ferner wäre es grob fahrlässig diesen Moment abzuwarten und dem Irrglauben zu verfallen, dass ein exponentieller Transformationsprozess, in dem Anfangs keine Fahrzeuge und im späteren Verlauf sehr viele Fahrzeuge angeschafft werden, denselben Effekt hat wie ein anzustrebender linearer Transformationsprozess bei dem eben eine anfänglich höhere Kostenlast entsteht. In dem bereits zitierten Eckpunktepapier für eine Reform des Klimaschutzgesetzes beziffert die Agora Energiewende das verbleibende Treibhausgasbudget bis zum Jahr 2050 für die gesamte Bundesrepublik auf 8,804 Mrd. t CO₂e. Dieselbe Quelle verortet 19,23% der Gesamttreibhausgasemissionen in Deutschland in dem Verkehrssektor. Demnach lässt sich das Treibhausgasbudget für den Verkehrssektor bis 2050 überschlägig auf 1,694 Mrd. t beziffern (Das exakte Budget ist etwas geringer, da eine Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors bereits zum Jahr 2045 erforderlich ist). Das Pro-Kopf-Treibhausgasbudget für den Verkehrssektor (83,02 Mio.

¹⁴¹ (58)

¹⁴² (59)

Einwohner) beträgt bis zum Jahr 2050 ca. 20,39 t. und damit insgesamt für die Stadt Brake (14.824 Einwohner (Stand 12/2020)) 302.261,36 t CO₂e. Dividiert durch die durch Anwendung der Wasserstofftechnologie vermeidbare Treibhausgasemission der erhobenen Prozesse von 27.196,68 t CO₂e reicht das Treibhausgasbudget im Falle einer strikten Ablehnung sämtlicher Maßnahmen noch für 11,1 Jahre beziehungsweise bis zum Jahr 2033. Danach ist die Einhaltung des Klimaziels bis zum Jahr 2045 nicht mehr realisierbar ungeachtet dessen, wie schnell und wie viele klimaneutrale Fahrzeuge ab dann angeschafft und fossil betriebene Fahrzeuge ab dann aus dem Verkehr gezogen werden.

5.7 Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Wasserstofftechnologien in der Hafen- und Straßengüterlogistik

1. Linearer Transformationsprozess

Die Erkenntnisse aus Abschnitt 5.6 heben deutlich hervor, dass der Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Hafen- und Straßengüterlogistik einen linearen Verlauf einnehmen muss. Das führt zwar zu anfänglich höheren Anschaffungskosten der Fahrzeuge im Vergleich zu einem späteren Umstieg auf klimaneutrale Alternativen, hat aber den großen Vorteil, dass der Druck auf die Unternehmen nicht mit jedem weiteren Jahr der Aufschiebung ansteigt. Gleichzeitig kann nicht erwartet werden, dass auch ohne die Inkaufnahme von zusätzlichen Kosten durch Unternehmen mit Vorreiterrolle und einer damit zusammenhängenden mangelnden Nachfrage nach wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen die Produktionszahlen der Fahrzeughersteller steigen und die Anschaffungskosten sinken.

2. Kooperation der Unternehmen

Der Ansatz einer gemeinschaftlichen Bewältigung von Herausforderungen wie dem Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Logistik kann für die einzelnen Unternehmen die Last reduzieren, z. B. durch den Zusammenschluss zu Einkaufsgemeinschaften. Mit der Anschaffung größerer Stückzahlen sinken die Kosten pro Fahrzeug im Vergleich zu Einzelbestellungen. Dabei sollte sich die Kooperation der Unternehmen nicht auf das Gebiet innerhalb Grenzen der Stadt Brake oder der Wesermarsch beschränken, sondern auch ein überregionaler Zusammenschluss zu Kaufgemeinschaften angestrebt werden. Insbesondere für die Anschaffung von hafenspezifischen Umschlaggeräten ist ungeachtet des Konkurrenzgedankens eine Kooperation mit anderen Hafenstandorten für gemeinsame Bestellungen größerer Fahrzeugstückzahlen zu empfehlen.

3. Inanspruchnahme laufender Fördermaßnahmen

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur fördert im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2 (NIPII) vorerst bis zum Jahr 2026 Maßnahmen der Marktaktivierung mit dem Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität (BANz AT 27.07.2021 B4)¹⁴³. Darin werden explizit Investitionszuschüsse für Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur gefördert. Weiterhin werden Sonderfahrzeuge in der Logistik, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind und die für deren Betrieb notwendige Betankungsinfrastruktur als Fördergegenstände genannt und quantifiziert. Pauschal werden 40% der Investitionsmehrausgaben bezuschusst, KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden.

In der „Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur“ (Richtlinie KsNI) vom 2. August 2021 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur wird die bis zum Jahr 2024 andauernde Förderung der Mehrkosten bei Anschaffung klimafreundlicher Nutzfahrzeuge geregelt.¹⁴⁴ Dank einer kürzlich erfolgten Genehmigung der EU ist sogar die Förderung von 80% der Investitionsmehrausgaben als nicht rückzahlungspflichtiger Zuschuss möglich. Konkret umfasst die Förderrichtlinie als Teil der Umsetzung des Gesamtkonzepts klimafreundliche Nutzfahrzeuge drei Elemente:

1. Förderung der Anschaffung von neuen klimafreundlichen Nutzfahrzeugen der EG-Fahrzeugklassen N1, N2 und N3 sowie auf alternative Antriebe umgerüsteter Nutzfahrzeuge der EG-Fahrzeugklassen N2 und N3 in Höhe von 80% der Investitionsmehrausgaben im Vergleich zu einem konventionellen Dieselfahrzeug,
2. Förderung der für den Betrieb der klimafreundlichen Nutzfahrzeuge erforderlichen Tank- und Ladeinfrastruktur in Höhe von 80 % der zuwendungsfähigen projektbezogenen Gesamtausgaben,
3. Förderung der Erstellung von Machbarkeitsstudien zu Einsatzmöglichkeiten von klimafreundlichen Nutzfahrzeugen sowie der Errichtung bzw. Erweiterung entsprechender Infrastruktur in Höhe von 50 % der zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben.

Für die Unternehmen des Untersuchungsgebiets sind diese Fördermaßnahmen und Förderaufrufe eine große Chance. Besonders der dritte Punkt erleichtert die Finanzierung von

¹⁴³ (60)

¹⁴⁴ (61)

Machbarkeitsstudien zur Umrüstung von Spezialfahrzeugen, für die aktuell kein passendes klimaneutrales Ersatzfahrzeug am Markt erworben werden kann. Hierbei benötigen Sie jedoch erfahrungsgemäß Unterstützung, um solche ambitionierten Vorhaben neben dem Tagesgeschäft umzusetzen. Weitere Kooperationen, beispielsweise zwischen den Unternehmen der Stadt Brake und Forschungseinrichtungen sowie Hochschulen mit dem Ziel diese Vorstöße in Rahmen von Verbundprojekten zu begleiten und die Unternehmen bei der Ausführung dieser Aktivitäten zu unterstützen, sind daher dringend erforderlich und bieten eine Möglichkeit, der effektiven Weiterverarbeitung der Ergebnisse aus dem Projekt H2BrakeCO2.

4. Etablierung eines Testfeldes für Wasserstoffanwendungen im Hafen und Logistikbereich

Auch wenn innerhalb des HyExperts-Projekts H2BrakeCO2 sehr deutlich und tlw. sehr konkret die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff-Technologie in den Bereichen Logistik und Hafen sowie die daraus abzuleitenden Bedarfe erarbeitet wurden, so gilt es festzustellen, dass sowohl die politischen und finanziellen Rahmenbedingungen als auch tlw. die notwendigen Technologien sich noch nicht in einem Stadium befinden, dass eine direkte Umsetzung durch die Unternehmen möglich ist.

Dies gilt nicht nur für den Bereich der Hafenlogistik und -schifffahrt, sondern auch für den Bereich der Straßengüterlogistik.

In der Intralogistik sind zunächst tlw. noch erst die Fahrzeuge zu entwickeln bzw. ggf. auf Wasserstofftechnologie umzurüsten. In der Straßengüterlogistik sind trotz zunehmender Verfügbarkeit von Fahrzeugen im Lkw-Bereich noch eine Reihe von offenen Fragestellungen jeweils konkret für die betroffenen Unternehmen zu klären. Bspw. In der Abwägung von Batterie- und Brennstoffzellentechnologie, aber auch hinsichtlich der benötigten Nutzlasten und der Streckenprofile.

Bei all diesen Fragestellungen benötigen die Unternehmen weitere Unterstützung und Entlastung von Experten, um diese Fragestellungen zu beantworten. Tlw. können Technologien auch für größere Nutzerkreise erprobt und auf ihre Einsatzfähigkeit in den geforderten Szenarien geprüft werden.

Es ist daher geplant das Projekt H2BrakeCO2 in der Form weiterzuführen, dass zum einen Machbarkeitsstudien mit einzelnen Unternehmen durchgeführt werden und (sukzessive) der Aufbau eines Testfeldes im Rahmen konkreter und wissenschaftlich begleiteter Piloteinsätze in den verschiedenen Fahrzeugbereichen.

Der Aufbau dieses Testfeldes wird aktiv seitens der Stadt Brake unterstützt und vorangetrieben. Für die wissenschaftliche Begleitung steht das In-Institut „Smart Mobility

Institute“ der Hochschule Bremerhaven¹⁴⁵ bereit, das aufgrund umfangreicher einschlägiger Projekterfahrung (H2 Cool, H2BPMM, KuBoP, SH2unter etc.) die notwendige Expertise für Design und Umsetzung von Piloten sowie deren wissenschaftliche Begleitung mitbringt.

In diesem Rahmen ist zu erwarten, dass H2BrakeCO2 bzw. die Fortführung auch auf Bundesebene weiterhin einen signifikanten Beitrag zum fortschreitenden Einsatz der Wasserstofftechnologie und damit zur angestrebten CO2-Neutralität im Verkehrssektor in den Bereichen Güterlogistik und Hafen beitragen kann.

5. Zusammenarbeit mit anderen regionalen Wasserstoffinitiativen und Nutzung bestehender Netzwerke

Wie bereits in Abschnitt 3.4 ausführlicher erläutert, profitiert die Stadt Brake und das Projekt H2BrakeCO2 von der starken regionalen Vernetzung zu Projekten wie Hyways for Future, Clean Hydrogen Coastline oder dem Energiewendedrehkreuz Wesermarsch und der damit einhergehenden Einbettung in einer Landschaft aus diversen miteinander verzahnten Wasserstoffinitiativen. Dieses Netzwerk erleichtert nicht nur den Protagonisten der Initiativen den Austausch von Informationen und die Schaffung von Synergien, sondern bietet auch den Unternehmen der Braker Logistik eine Plattform, die die Kooperation zu anderen Unternehmen zwecks weiter oben beschriebener Aktivitäten ermöglicht. Die aktive Nutzung und Beteiligung der Unternehmen an diesem Netzwerk sichern dessen Fortbestand und tragen zur stetigen Ausweitung dessen Reichweite bei. Ein Testfeld in Brake würde sich zudem in die bestehenden Projektinitiativen einbetten lassen und diese sinnvoll ergänzen.

¹⁴⁵ www.smart-mobility-institute.de

6 Gestaltung der Infrastruktur

In dem folgenden Abschnitt werden sämtliche Bausteine, die zu der Gestaltung der Infrastruktur und für den Aufbau und die Aufrechterhaltung einer Wasserstoffwirtschaft beitragen betrachtet, analysiert, quantifiziert und dimensioniert. Die Orientierung entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette trägt dazu bei, dass das volle Potential des Energieträger Wasserstoff ausgeschöpft wird und verbessert zudem die Energiebilanz durch die Nutzung der Neben- und Sekundärprodukte.

Ferner werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Produktion, die Verteilung und die Bereitstellung des Wasserstoffs erarbeitet.

6.1 Anschaffung eines Elektrolyseurs

Das vielzitierte Henne-Ei-Problem beginnt bereits bei der Herstellung des Wasserstoffs und der dafür benötigten Elektrolysekapazität. Die „Wasserstofffarbenlehre“ veranschaulicht die Vielzahl unterschiedlicher Wasserstoffgewinnungsmethoden. Einige Beispiele dieser Wasserstofffarben und deren Herstellungsverfahren sind der graue Wasserstoff (Verfahren: THG-intensive Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas über die Dampfreformierung), blauer Wasserstoff (Verfahren: grauer Wasserstoff, bei dem das anfallende CO₂ aufgefangen und unterirdisch gespeichert wird), türkiser Wasserstoff (Verfahren: Wasserstoffgewinnung über die Methanpyrolyse, bei der fester Kohlenstoff anfällt) und grünem Wasserstoff der mittels Elektrolyse unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen klimaneutral hergestellt werden kann. Von der Verwendung grauen Wasserstoffs wird aufgrund seiner THG-intensiven Herstellung langfristig abgesehen. Lediglich in der Übergangsphase hin zu einem Zustand, in dem sämtlich benötigter Wasserstoff klimaneutral hergestellt wird, ist die Verwendung von grauem Wasserstoff in brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen akzeptabel.

Blauer und türkiser Wasserstoff sind zwar prinzipiell klimaneutral, ermöglichen aber nicht die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern. Daher ist die Elektrolyse als Herstellungsverfahren von Wasserstoff die einzige Lösung, die gleichzeitig eine klimaneutrale und eine von fossilen Energieträgern unabhängige Wirtschaft ermöglicht. Für eine absolute Klimaneutralität muss der Strom für die Elektrolyse vollständig aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Wasserstoff aus der Elektrolyse unter Verwendung eines Strommix wird als gelber Wasserstoff bezeichnet und ist mit der indirekten THG-Emission aus der fossilen Stromerzeugung belastet. Wasserstoff aus der Elektrolyse unter Verwendung von Strom aus Kernenergie wird als roter Wasserstoff bezeichnet und ist zwar prinzipiell

klimaneutral, jedoch mit den nicht mehr tragbaren Folgen der Kernenergie belastet. Daher ist grüner Wasserstoff, gewonnen aus der Elektrolyse unter Verwendung erneuerbaren Energiequellen, langfristig alternativlos und muss keinen weiteren Auswahlverfahren unterzogen werden.

Es existieren diverse Elektrolyseverfahren, von denen sich einige derzeit in der Entwicklung befinden und auf die hier aus Platzgründen nicht vollumfänglich eingegangen wird. Unter den bereits bewährten Elektrolyseverfahren sind die alkalische Elektrolyse und die PEM-Elektrolyse (proton-exchange membrane oder polymer-electrolyte membrane) hervorzuheben. Beide spalten Wasser unter Verwendung elektrischen Stroms in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff auf, mit dem Unterschied, dass die Elektroden bei der alkalischen Elektrolyse in einen Elektrolyten (wässrige Lösung, in der Regel hergestellt aus Kaliumhydroxid) eingetauscht werden und in der PEM-Elektrolyse die Rolle des Elektrolyten durch einen festen Bestandteil des Membrankunststoffs übernommen wird. Darüber hinaus bestehen Membran und Elektroden bei der PEM-Elektrolyse aus Edelmetallen und teuren Rohstoffen darunter Gold, Platin, Iridium und Titan. Die größten Vorteile der PEM-Elektrolyse im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse sind ihr besseres Teillastverhalten, welches durch die fluktuierende Leistungsbereitstellung von Wind- und Solarenergie von Bedeutung ist. Darüber hinaus weist sie eine längere Lebensdauer auf.

6.1.1 Ermittlung der notwendigen Elektrolyseurleistung

Die benötigte Elektrolyseurleistung hängt mit den benötigten Wasserstoffmengen in direkten Zusammenhang und sollte modular aufgebaut sein, sodass die Leistung bei steigendem Wasserstoffbedarf in mehreren Stufen erweitert werden kann. Hierbei sind die Ausbaustufen zu berücksichtigen. Die Investitionskosten des Elektrolyseurs sind im Verhältnis zu den Betriebskosten nahezu vernachlässigbar. Zudem verhalten sie sich nicht linear. Diesbezüglich ist die Wahl der Mindestgröße des Elektrolyseurs entscheidend, um die Herstellung des Wasserstoffs zu attraktiven Preisen realisieren zu können.

Abbildung 49 veranschaulicht den Einfluss der Elektrolyseurleistung und dem Stromeinkaufspreis auf die sich einstellenden Produktionskosten eines Kilogramms Wasserstoff.

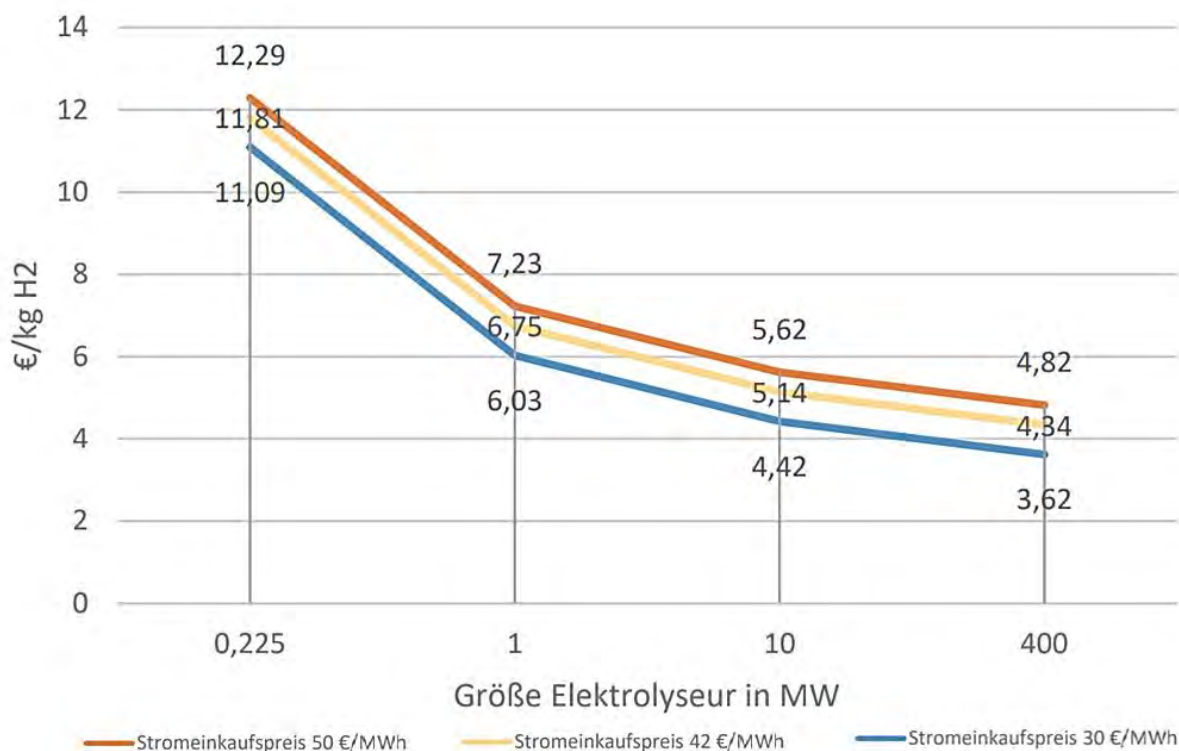


Abbildung 49: Produktionskosten für Wasserstoff in Abhängigkeit von Elektrolyseurleistung und Stromeinkaufspreis¹⁴⁶

Variante ohne Stromsteuer gemäß § 9a Abs. 1 Ziffer 1 StromStG; keine Netzentgelte, EEG-Umlage anteilig zw. 15% und 40%

Tabelle 48: Wasserstofferzeugungsdaten unterschiedlicher Elektrolyseurleistungen¹⁴⁷

Leistung [MW]	Output [Nm ³ /h]	max. Output [kg H2/Tag]	Output [kg H2/h]
0,100	21	45	1,875
0,225	46,3	100	4,17
1	210	450	18,75

Bedingt durch den langwierigen Anschaffungsprozess eines Elektrolyseurs von der Bestellung bis zur Genehmigung, Installation und Inbetriebnahme der Anlage, wird eine Dimensionierung präferiert, die mindestens den täglichen Wasserstoffbedarf bis zum Jahr 2030 decken kann. So verbleibt genügend Planungsspielraum zum Ende dieses Zeitfensters, um nötige Maßnahmen zur Deckung der weiter steigenden täglichen Wasserstoffbedarfe zu erarbeiten. Entweder über eine Erweiterung der Kapazitäten oder über die bis dahin entstandenen Wasserstoffverteilnetzwerke. Auf Seiten der Umschlaggeräte und Fahrzeuge stellt sich gemäß Tabelle 30 im Jahr 2030 ein täglicher Wasserstoffbedarf von 1.334,28 kg und gemäß Tabelle 32 auf Seiten der LKW ein täglicher Wasserstoffbedarf von 2.134,68 kg ein. In der Summe beträgt der landseitige Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 somit 3.468,96 kg pro Tag. Unter der

¹⁴⁶ (62)

¹⁴⁷ (63)

Annahme einer hohen Anzahl jährlicher Betriebsstunden in Höhe von 7.300 Stunden und einer damit einhergehenden täglichen Auslastung von 20 Stunden müsste der Elektrolyseur einen Wasserstoffoutput von 173,45 kg/h leisten können, was einer elektrischen Leistung von 9,25 MW oder aufgerundet 10 MW entspricht.

Sollte sich die Wasserstoffnachfrage in der Stadt Brake mittelfristig gemäß der in Kapitel 5 berechneten anzunehmenden Wasserstoffbedarfe entwickeln, so ist die zu Beginn zu installierende Elektrolyseurleistung nicht unter 10 MW anzusetzen. Bis 2025 sollte diese Leistung spätestens installiert sein, da zu diesem Jahr mit einer Marktreife aller Fahrzeugarten zu vertretbaren Anschaffungskosten zu rechnen ist und der Markthochlauf dann an Geschwindigkeit zunehmen wird.

Zum Jahr 2030 ist die Leistung auf 17 MW zu erhöhen, um die täglichen Bedarfe an Wasserstoff bis zum Jahr 2035 zu decken. Bei gleichbleibender Auslastung ist die Leistung zum Jahr 2035 auf 23 MW zu erhöhen, um den täglichen Wasserstoffbedarf bis zum Jahr 2045 zu decken. Der durch die Substitution der erhobenen LKW und Umschlaggeräte verursachte tägliche Wasserstoffbedarf wird den Berechnungen in diesem Konzept zufolge im Jahr 2045 bis zu 8.522,15 kg betragen. Für die Deckung dieses Bedarfs ist bei 20 Betriebsstunden pro Tag bereits eine Leistung von 22,73 MW ausreichend. Zusammengefasst sind folgende Elektrolysekapazitäten zu installieren:

Tabelle 49: Zu installierende Elektrolyseleistung zur Deckung der Wasserstoffbedarfe der landseitigen Logistikprozesse

Bis zum Jahr	Elektrolysekapazität [MW]	Täglicher Wasserstoffbedarf gedeckt bis
2025	9,25	2030
2030	16,83	2035
2035	22,73	2045

Die in Tabelle 49 aufgeführte Elektrolysekapazität zur Deckung des täglichen Wasserstoffbedarf bezieht sich lediglich auf die landseitigen Logistikprozesse. Jedoch wird ein wesentlicher Teil der Hafenlogistik durch wasserseitige Prozesse realisiert, die in Kapitel 5.3 durch den Einsatz von Wasserstofftechnologie in der Schifffahrt thematisiert werden. Innerhalb des Projektes H2BrakeCO2 wurde erarbeitet, dass sich im Sektor Schifffahrt Methanol besser eignet als der direkte Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff. Da jedoch eine vollständige Wasserstoffinfrastruktur als Voraussetzung gegeben sein muss, um Methanol selbst herzustellen, wird die benötigte Elektrolyseleistung separat betrachtet. Voraussichtlich wird ein Methanol-Import als kurzfristige Lösung notwendig sein, sodass eine Erweiterung der Elektrolysekapazität zur Abdeckung der eigenen Methanol-Herstellung erst mittelfristig eine

Rolle spielen wird. Die Höhe der zusätzlichen Elektrolyseleistung für den Schifffahrtssektor ist in Tabelle 50 dargestellt und ergibt sich aus den errechneten täglichen Wasserstoffbedarfen aus Kapitel 5.3.2. Vergleichbar mit dem Rechenansatz für Tabelle 49 wird davon ausgegangen, dass der Elektrolyseur 20 Stunden pro Tag an 360 Tagen im Jahr in Betrieb ist. Bei einem Bedarf von 265,66 kg H₂/Tag im Jahr 2030 wird zur Abdeckung des Schifffahrtssektors eine Elektrolysekapazität von 0,71 MW benötigt. Im Jahr 2035 besteht bereits eine Nachfrage von 501,80 kg H₂/Tag, somit sollte im Jahr 2030 eine zusätzliche Elektrolysekapazität von 1,34 MW installiert werden. Für das Jahr 2035 ergibt sich bereits eine Kapazität von 1,81 MW, sodass der Bedarf von 678,90 kg H₂/Tag bis 2045 abgedeckt werden kann.

Tabelle 50: Zu installierende Elektrolyseleistung zur Deckung des Wasserstoffbedarfs der wasserseitigen Logistikprozesse

Bis zum Jahr	Elektrolysekapazität [MW]	Täglicher Wasserstoffbedarf gedeckt bis
2025	0,71	2030
2030	1,34	2035
2035	1,81	2045

Im Rahmen der Auslegung des Elektrolyseurs (siehe Tabelle 50) muss entsprechend der benötigten Elektrolysekapazität entschieden werden, welcher modularer Aufbau der Elektrolyseanlage zu welchem Zeitpunkt am geeignetsten ist, um die tägliche Nachfrage an Wasserstoff abdecken zu können.

6.1.2 Festlegung von Art und Standort des Elektrolyseurs

Für die Standortwahl gibt es mehrere Kriterien, die betrachtet und in einer Bewertung gegenübergestellt werden müssen. Die vermeintlich einfache und schnelle Lösung, den Elektrolyseur möglichst nah an die erneuerbare Energiequelle (z.B. Windpark) zu platzieren, damit evtl. die EEG-Umlage entfällt, stellt eine Reihe von Anforderungen.

Aktuell laufen die Diskussionen um welche Art der Energienutzung es sich bei der Produktion von Wasserstoff handelt und welche Steuern, Umlagen und Abgaben damit in Verbindung stehen bzw. für die Produktion von Wasserstoff entfallen sollten.

Es sind die Stromsteuer, die EEG-Umlage und die Netzentgelte im besonderen Fokus. Aber auch die weiteren netzentgeltbezogenen Strompreisbestandteile wie Konzessionsabgaben, KWK-Umlage, Offshore Haftungsumlage, StromNEV-Umlage, Umlagen für abschaltbare

Lasten (AbLaV-Umlage) und vermiedene Netzentgelt sind zu betrachten. Es ist also zweckmäßig, bei der Argumentation für eine Befreiung alle Abgaben zu berücksichtigen.

Bei der Diskussion wird aktuell unterschieden zwischen Energiespeicher und Letztverbraucher, wobei derzeit keine einheitliche energierechtliche Definition für Energiespeicher existiert. Nach aktuellem Recht gilt die Produktion von Wasserstoff zur Energiespeicherung als Letztverbraucher und somit ist die benötigte Energie mit allen Abgaben belastet.

Dies soll in evtl. Planungen dadurch umgangen werden, in dem der Elektrolyseur in oder bei z.B. einem Windpark so in das Energienetz integriert wird, bevor dieses mit dem öffentlichen Netz verbunden ist. Aber ob dies möglich ist, hängt auch von den jeweiligen baurechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben bzw. Beschränkungen ab und ist jeweils standortabhängig mit der jeweiligen Genehmigungsbehörde abzustimmen. Zusätzlich ist zu der Produktion von Wasserstoff auch die Lagerung bzw. Speicherung und evtl. Kompression zu betrachten, für die dies im gleichen Umfang gilt.

Auch die Art der Elektrolyse stellt Anforderungen an den Standort. Hier sind neben ökonomischen auch die ökologischen Beeinflussungen durch die Art der Elektrolyse zu berücksichtigen, wodurch weitere standortabhängige umweltrechtliche Genehmigungsfragen zu klären wären. In der aktuellen technischen Entwicklung, sehen die Ersteller des Konzepts in der PEM Elektrolyse die geringsten umwelttechnischen Beeinträchtigungen, gleichwohl ist eine Genehmigung auch hier nach Bundesemissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich.

Sollte aus genannten Gründen eine Produktion in der unmittelbaren Nähe einer Energiequelle erfolgen, ist der Transport in den Hafen von Brake eine weitere Herausforderung. Zu Beginn der Realisierung kann davon ausgegangen werden, dass der Mengenbedarf an Wasserstoff überschaubar ist und eine eigene Versorgungsinfrastruktur (z.B. Pipeline) aus ökonomischer Sicht nicht in Frage kommt. Gerade zu Beginn ist die Beschaffung von Wasserstoff, der Umschlaggeräte und Fahrzeuge noch unterstützungsbedürftig. Zu Beginn ist also eine Versorgung von der Produktion zum Hafen über eine Trailer-Versorgung realistisch, wobei es sich auch hier bei der benötigten Zugmaschine im Sinne des Projektes und der CO₂ Betrachtung schon um ein Wasserstofffahrzeug handeln sollte.

Andersherum betrachtet wäre eine Produktion vor Ort ein Lösungsweg, aber hier ist nach der aktuellen regulatorischen Lage die Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion als Letztverbraucher eingestuft und die benötigte Energie würde mit allen oben genannten Abgaben belegt. Die Einsparungen der nicht benötigten Versorgungsinfrastruktur stehen den sicherheitstechnischen Anforderungen für Lagermengen und Sicherheitsabständen im eng bebauten Hafengebiet gegenüber.

Unter den gegebenen Umständen und Möglichkeiten wird für den Braker Hafen eine Produktion außerhalb des Hafens und Stadtgebietes vorschlagen und eine Belieferung mit Trailer vorgesehen. Auch wenn der Bedarf im Hafengebiet größer wird und eine feste Tankstelle vor Ort sinnvoll ist, ist für diese eine Belieferung mit Trailer auch in Zukunft möglich. Welche Art der Energiequelle (Windpark, Solarpark oder kombiniert) für eine mögliche Produktion ausgewählt wird, hängt von der dann grundsätzlichen Verfügbarkeit dieser, den räumlichen Zusammenhängen und den genehmigungsrechtlichen Anforderungen ab. Daher ist zum aktuellen Zeitpunkt noch keine genaue Standortauswahl möglich. Allerdings geben die in Kapitel 3.1 aufgeführten existierenden Standorte für regenerative Energieerzeugung im Untersuchungsgebiet und der Wesermarsch insgesamt bereits konkrete Anhaltspunkte für eine Standortwahl.

6.1.3 Ermittlung der Anschaffungs- und laufenden Kosten eines PEM-Elektrolyseurs

Ein 1 MW PEM-Elektrolyseur kostet ca. 900.000 Euro im Einkauf.¹⁴⁸ Damit können 18,75 kg H₂/h produziert werden. Der Strombedarf beläuft sich bei 20 Betriebsstunden am Tag auf 20 MWh/Tag. Bei 5 Cent / kWh, zuzüglich Wasser ist sofort erkennbar, dass die laufenden täglichen Stromkosten von in diesem Fall 1000 € die Investitionskosten bereits nach ca. 2,5 Jahren übersteigen. Die Kosten für die Erzeugung von Wasserstoff hängen zum größten Teil von den Stromkosten ab, können jedoch bei hohen Stromkosten durch eine starke Anhebung der Betriebsstunden wieder in einen wirtschaftlich tragbaren Bereich gebracht werden. (siehe Abbildung 50)

		Betriebsstunden Elektrolyseur (1 MW)							
		200	500	1.000	2.000	4.000	6.000	8.000	
Kosten- Strombezug	0 ct/kWh	27,5	11,0	5,5	2,9	1,7	1,4	1,2	€/kg H ₂
	2 ct/kWh	28,6	12,1	6,6	4,0	2,8	2,5	2,3	€/kg H ₂
	4 ct/kWh	29,7	13,2	7,7	5,1	3,9	3,6	3,4	€/kg H ₂
	6 ct/kWh	30,8	14,3	8,8	6,2	5,0	4,7	4,5	€/kg H ₂

Abbildung 50: Wasserstoffgestehungskosten in Abhängigkeit Betriebsstunden und der Kosten für den Strombezug¹⁴⁹

Bei der Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien mittels Elektrolyseurs sind im geltenden Rechtsrahmen die wichtigsten Faktoren mit Einfluss auf die Gestehungskosten:

¹⁴⁸ (64)

¹⁴⁹ (62)

- Anlagengröße (und der Automatisierungsgrad der Herstellung)
- Auslastungsgrad (mögliche Anzahl von Betriebsstunden des Elektrolyseurs pro Jahr)
- Stromeinkaufspreis (bzw. Stromgestehungskosten mit erneuerbaren Energien)
- Stromnebenkosten (Belastung der laufenden Kosten mit Steuern, Abgaben und Umlagen)
- Genehmigung (Kosten und Zeit)

Die Größe des Elektrolyseurs bietet erhebliches Kostenreduktionspotential durch Skaleneffekte. Dies liegt zum einen an den spezifischen Herstellungskosten pro kW, die mit zunehmender Leistung sinken. Darüber hinaus führen die erheblichen Genehmigungskosten nach BImSchG und die einkonzentrierte Baugenehmigung zu sinkenden Kosten bei steigender Leistung, weil es keine vereinfachte Genehmigung für kleinere Elektrolyseure gibt. Die Genehmigungskosten eines kleineren Elektrolyseurs sind wegen des durchzuführenden formellen Verfahrens etwa genauso hoch wie bei einem größeren Elektrolyseur.

Somit entfallen im geltenden Rechtsrahmen bei einem Elektrolyseur mit 10 MW auf 1 kg Wasserstoff 2,40 € weniger Anlagenkosten als bei einem Elektrolyseur mit 0,225 MW (durch geringere spezifische Investitionskosten und Genehmigungskosten).

Die Stromnebenkosten differieren je nach Anlagengröße um bis zu 1,19 ct/kWh. Das entspricht einer Differenz von 0,72 €/kg H₂. Bei kleineren Elektrolyseuren können die Kosten durch Eigenverbrauch aus EE-Anlagen geringgehalten werden. Bei größeren Elektrolyseuren (etwa ab 15 MW) sinken die EEG-Kosten, wenn der Letztverbraucher eine EEG-Reduktion als stromintensives Unternehmen ab der 1. GWh gemäß § 64 EEG geltend machen kann.

Mit zunehmender Leistung der Anlage werden die Investitionen in die Hardware immer weniger entscheidend. Mit den zu erwartenden Anlagengrößen bei einem Markthochlauf werden die Strombezugskosten und die Stromnebenkosten (hauptsächlich die Netzentgelte und die EEG-Umlage) preisbestimmend sein.¹⁵⁰

6.1.4 Maßnahmen zur Deckung der Differenz aus erzeugbarer Wasserstoffmenge und Gesamtbedarf

In dem Abschlussbericht einer Leitstudie der Deutschen Energie-Agentur (dena) mit dem Titel *Aufbruch Klimaneutralität aus dem Jahr 2021* werden entscheidende Handlungsfelder und Lösungsansätze zum Erreichen der bundesdeutschen Klimaneutralität im Jahr 2045 identifiziert. Im Kontext des vorliegenden Gesamtkonzepts spielen die in dieser Studie

¹⁵⁰ (62)

dargestellten anzustrebenden Entwicklungsverläufe des Energiebedarfs und -verbrauchs der Bundesrepublik Deutschland zwischen den Jahren 2018 und 2045 eine besondere Rolle.

	2018	Δ gesamt	Δ pro Jahr	2030	Δ gesamt	Δ pro Jahr	2045
Primärenergieverbrauch (TWh)	3.647	-1198	-100	2.449	-652	-43	1.797
davon Kohle	808	-691	-58	117	-117	-8	0
davon Öle	1.226	-514	-43	712	-676	-45	36
davon Erdgas	871	-160	-13	711	-665	-44	46
davon inländisch erzeugte erneuerbare Energien	501	249	21	750	329	22	1.079
davon importierte synthetische Energieträger	0	60	5	60	537	36	597
Endenergieverbrauch (TWh)	2.489	-526	-44	1.963	-486	-32	1.477
davon Kohle	124	-61	-5	63	-63	-4	0
davon Gase (methanbasiert)	617	-200	-17	417	-304	-20	113
davon flüssige Energieträger (Öle)	935	-395	-33	540	-382	-25	158
davon Strom	513	104	9	617	107	7	724
davon Wasserstoff	0	38	3	38	188	13	226

Abbildung 51: Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs der BRD bis zu dem Jahr 2045¹⁵¹

Aus Abbildung 51 geht hervor, dass zum Erreichen der Klimaneutralität eine Herabsenkung des Primärenergieverbrauch der BRD von 3.647 TWh im Jahr 2018 auf 1.797 TWh im Jahr 2045 angestrebt werden muss (Halbierung). Gleichzeitig muss der durch erneuerbare Energien bereitgestellte Anteil am Primärenergieverbrauch von 501 TWh im Jahr 2018 auf 1.079 TWh im Jahr 2045 ansteigen (Verdopplung). Analog hierzu muss der Endenergieverbrauch von 2.489 TWh im Jahr 2018 auf 1.477 TWh im Jahr 2045 gesenkt werden. Der Endenergieverbrauch mittels der Verwendung von Strom wird bis zum Jahr 2045 um 41,13% ansteigen. Die durch die direkte Verwendung von Wasserstoff bereitgestellte Endenergie wird im Jahr 2045 in diesem Szenario 226 TWh betragen. Darüber hinaus bedingt die Defossilisierung von Öl und Gas einen zusätzlichen Verbrauch von Wasserstoff als Zwischenmedium zur synthetischen Herstellung dieser Energieträger.

¹⁵¹ (84)

Primärenergiebedarf (TWh)	2018	2030	2045
Kernenergie	230,3	0,0	0,0
Steinkohle	396,7	46,9	0,1
Braunkohle	411,3	70,2	0,1
Öl	1.225,8	712,5	35,9
Erdgas	871,4	710,8	45,6
Sonstige	59,6	58,0	14,4
Erneuerbare	500,6	749,9	1.078,7
Stromhandelsbilanz	-48,7	40,5	25,9
H2-Importe	0,0	56,3	398,3
PtG/PtL-Importe	0,0	3,7	198,3
Summe	3.647,0	2.448,7	1.797,2

Abbildung 52: Entwicklung des Primärenergiebedarfs der BRD bis zu dem Jahr 2045¹⁵²

Wie aus Abbildung 52 hervorgeht, ist die BRD im Jahr 2045 selbst bei einer Einhaltung und erfolgreichen Umsetzung des anzustrebenden Ausbaus erneuerbarer Energien noch auf den Import von insgesamt 596,6 TWh Energie angewiesen. Diese Energiemenge setzt sich aus rund 400 TWh gespeichert in Wasserstoff und rund 200 TWh gespeichert in Wasserstoffderivaten zusammen. Sollte der Ausbau erneuerbarer Energien nicht in der anzustrebenden Geschwindigkeit erfolgen, so ist davon auszugehen, dass entweder eine Klimaneutralität im Jahr 2045 nicht erreicht sein oder aber die zu importierende Menge dieser Energieträger noch höher ausfallen wird. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass Deutschland auch in Zukunft ein Energieimportland bleiben wird.. Dass es sich dabei um grünen Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen handeln muss, erschwert diese Aufgabe zusätzlich. Neben dem zu importierenden Wasserstoff muss auch für die Bewerksstellung des Importbedarfs grüner PtG- und PtL-Energieträger eine Lösung gefunden werden. Hier kann jedoch von der einfacheren Handhabung dieser Energieträger beim Transport (keine Hochdrucktanks oder Verflüssigung notwendig) profitiert werden.

Länder mit einem relativ niedrigen Energiebedarf und einer aufgrund ihrer geographischen Lage bereits vorliegenden Überproduktion grünen Stroms sehen in dem steigenden Wasserstoffbedarf im Ausland ihre Chance zu einem Aufstieg zur Wasserstoffexportnation. Ein Beispiel hierfür ist Schottland dessen Regierung im Jahr 2020 Pläne für die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft in Schottland angekündigt hat. Bis 2030 wird eine Elektrolyseur-

¹⁵² (84)

Kapazität von 5.000 MW angestrebt. Bis 2045 wird eine Kapazität von 25.000 MW angestrebt, wobei 75 % der Wasserstoffproduktion für den Export nach Kontinentaleuropa vorgesehen ist. Schottland verfügt über immense natürliche Ressourcen in Form von Windenergie, Wellenenergie, Gezeitenenergie und Wasserkraft. Im Jahr 2020 stammten 96 % des in Schottland verbrauchten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen, und Schottland ist bereits jetzt ein Stromexporteur in das übrige Vereinigte Königreich.¹⁵³ Bilanziell lässt sich mit der in Schottland für das Jahr 2045 angestrebten Wasserstofferzeugungskapazität ein Drittel des Wasserstoffimportbedarfs der BRD decken.

Neben Schottland hat auch Island das Potential eine Exportnation für grünen Wasserstoff zu werden. Geothermie und Wasserkraft liefern gegenwärtig 80% der Primärenergie des Landes. Die verbleibenden 20% decken importierte Treibstoffe für den Verkehr zu Land, zu Wasser und zu Luft.¹⁵⁴

Eine interessante Entwicklung ist auch in einigen Nordafrikanischen Ländern wie Marokko oder Ägypten zu verzeichnen, die insbesondere im Bereich Solarenergie große Ausbaupotentiale vorweisen. So befindet sich in Marokko mit dem solarthermischen Kraftwerk Noor in Ouarzazate der größte Solarkomplex der Welt. Außerdem sieht das im Juni 2020 in Berlin unterzeichnete deutsch-marokkanische Wasserstoffabkommen vor, dass die Bundesrepublik Marokko beim Bau einer Wasserstoffproduktionsanlage und der späteren Herstellung von grünem Wasserstoff unterstützt. Hierfür wurden bereits Mittel im Umfang von 300 Mio. Euro in Aussicht gestellt. Trotz dieser günstigen klimatischen und geographischen Ausgangslage zur Erzeugung grünen Stroms deckt Marokko seinen Energiebedarf nur zu einem Anteil von 40% aus erneuerbaren Energiequellen (2020). 2019 stammten nur 4% des produzierten Stroms des Landes aus Solaranlagen (1581 GWh), 12% aus Windkraftwerken (4587 GWh) und 4% aus Wasserkraft (1654 GWh). In Deutschland wurden zum Vergleich 2019 insgesamt 47.500 GWh Solar-Strom hergestellt und damit mehr als Marokko im selben Jahr aus konventionellen und erneuerbaren Energiequellen zusammen gewonnen hat. Darüber hinaus fehlt es dem Königreich an dem nötigen Wasser für die Wasserstoffproduktion. Bereits jetzt kämpfen viele Regionen Marokkos mit der Wasserknappheit. Die Süßwasserressourcen sind Gegenstand von lokalen Konflikten und setzen der Landwirtschaft enge Grenzen.¹⁵⁵

Insgesamt darf die Herausforderung zur Deckung des Wasserstoffbedarfs über Importe nicht unterschätzt und die Vorkommen überschüssiger erneuerbarer Energiemengen anderer Länder nicht überschätzt werden. Die Beispiele in diesem Abschnitt lassen vermuten, dass für

¹⁵³ (90)

¹⁵⁴ (91)

¹⁵⁵ (92)

eine Minimierung der Energieabhängigkeit der BRD von anderen Ländern der Aufbau einer stabilen und starken nationalen Wasserstoffwirtschaft von größter Bedeutung ist.

6.2 Untersuchung vorhandener Speicherungsmöglichkeiten

Es existieren mehrere Ansätze Wasserstoff zu speichern:

- Druckspeicher 200 bar, 300 bar, 500 bar, 900 bar
- Metallhydrid-Speicher (unterschiedliche Druckstufen)
- Flüssig Wasserstoff
- Kavernenspeicherung

Bei der Druckspeicherung ist die Druckstufe und Art der Komprimierung entscheidend für den Energiebedarf und den Betriebskosten der Anlage. Es gibt unterschiedliche Verfahren der Komprimierung. Als Beispiele sind das Verfahren von Linde mit einem Ionischen Verdichter, Membrankompressoren oder Kolbenkompressoren zu nennen.

Der Energiebedarf für die Komprimierung von Wasserstoff mittels Kolbenkompressor (siehe Abbildung 53) beträgt bei einer Leistung von ca. 90 kW für 20 kg/h 4,5kWh/kg Wasserstoff.



Abbildung 53: Kolbenkompressor mit einer Leistung von ca. 20 kg/h

Die Kühlleistung zum Kühlen des Wasserstoffs bei der Kompression muss mitberücksichtigt werden und liegt bei einem Kolbenkompressor mit einer Durchflussmenge von 20 kg/h bei ca. 75 kW (3,75 kWh/kg Wasserstoff).

Druckspeicher bis 300 bar sind seit Jahren als Stahlbehälter etabliert und kommen in diversen Größen zum Einsatz. H₂ Trailer mit Drücken bis zu 300 bar sind bereits im Einsatz.

Für Drücke oberhalb von 300 bar kommen Typ III und Typ IV Behälter zum Einsatz. Folgende Produkte sind derzeit verfügbar:

- Stahlflasche
 - Fassungsvermögen: 50 Liter für 1 kg Wasserstoff
 - Preis: ca. 320€ (Bei Abnahme größerer Mengen sinkt der Preis stark)
- Stahlbehälter
 - Fassungsvermögen: ca. 1000 Liter; ca. 50 kg Wasserstoff
 - Druckstufe: 450 bar
 - Preis: 111.000 USD (Quelle FIBA)
- Typ 3 Behälter und Typ IV Behälter
 - Fassungsvermögen: 350 Liter; ca. 10,7723 kg Wasserstoff
 - Druckstufe: 500 bar
 - Preis: 6600 Euro/Tank
- Metallhybridspeicher für große Mengen
 - Werden bisher nicht produziert
 - Preis: Es liegen keine Preise vor.
- Flüssiggastanks
 - Fassungsvermögen: nicht bekannt
 - Druckstufe: 40 bar
 - Preis: nicht bekannt

und

- 40“ Container
 - Druckstufe: 300 bar
 - Fassungsvermögen: 500 kg Wasserstoff
 - Druckstufe: 500 bar
 - Fassungsvermögen: 1000 kg Wasserstoff
 - Preise: nicht bekannt)

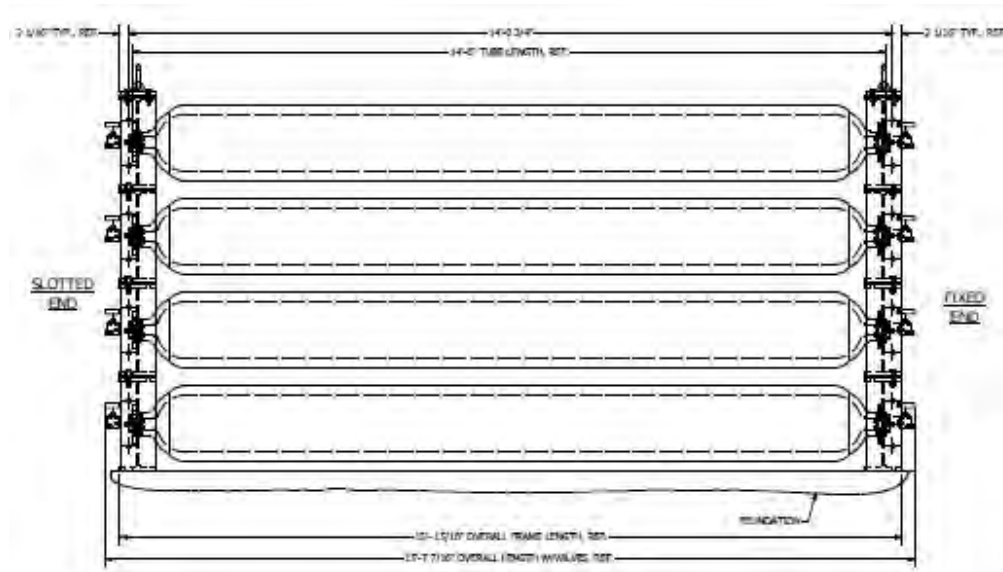


Abbildung 54: Firma Fibatech 900 bar H2 Pufferspeicher Stahlbehälter Batterie für H2 Tankstellen



Abbildung 55: NPROX 20' Container 500 bar und 500 kg



Abbildung 56: Beispiel 40“ Container Hexagon auf LKW montiert

Für die Speicherung großer Wasserstoffmengen sind Kavernenspeicher ideal geeignet. Wie bereits aus der Beschreibung des Projekts Clean Hydrogen Coastline im Abschnitt 3.4 hervorgeht, sind die Kavernen in Huntorf ein wichtiger Knotenpunkt in der norddeutschen Wasserstofflandschaft. Neben dem Unternehmen Uniper, welches am Standort Huntorf ein Druckluft-Speicherkraftwerk (CAES - Compressed Air Energy Storage) betreibt, verfügt die EWE Gasspeicher GmbH in unmittelbarer Nähe über Erdgas-Kavernenspeicher, die perspektivisch auch für die Wasserstoffspeicherung nutzbar sind. Die EWE sammelt dazu aktuell in verschiedenen Projekten umfangreiche Erfahrungen – beispielsweise im Forschungsprojekt HyCAVmobil zur Nutzung von Salzkavernen zur Wasserstoffspeicherung.¹⁵⁶

6.2.1 Kosten für die Speicherung des erzeugten Wasserstoffs

Die Kosten für die Speicherung von Wasserstoff hängen von der Art der Speicherung, der Druckstufe und der gespeicherten Menge ab. Typ IV und Typ V Druckgastanks können kostentechnisch bei ca. 960 €/kg Wasserstoff angesetzt werden. Für Tube Trailer mit 23.800 Liter Fassungsvermögen und einer Druckstufe von 300 bar liegen die Kosten bei ca. 500.000€. Zu Flüssiggastanks konnten keine Kosten ermittelt werden.

¹⁵⁶ (93)

6.3 Transport und Verteilung des erzeugten Wasserstoffs

Neben der Erzeugung und den Investitionen für die Bereitstellung des Wasserstoffs müssen auch unterschiedlichen Möglichkeiten für den Transport und die Verteilung des erzeugten Wasserstoffs untersucht werden.

6.3.1 Distribution des erzeugten Wasserstoffs

Wie bereits im Abschnitt 5.2.1 erläutert wurde, befindet sich derzeit (August 2021) eine Wasserstofftankstelle im Hafengebiet der Stadt Brake durch ein Konsortium unter Leitung der EWE Gasspeicher GmbH im Rahmen des Projekts Hyways for Future in Planung. Unter dieser Annahme sollte ab einer bestimmten Produktionsmenge in Erwägung gezogen werden, den Transport des Wasserstoffs für bestimmte Strecken über eine Hochdruck Pipeline zu realisieren. Die Kosten der H₂ Pipeline können auf 5.000€/m - 7.000 €/m geschätzt werden.¹⁵⁷ Eine Pipeline hätte den Vorteil, dass innerhalb des Untersuchungsgebiets kaum bis gar keine Wasserstoff-Logistik mehr notwendig wäre. Für die Befüllung der Gabelstapler im Hafengebiet zum Beispiel wäre nur noch ein vereinfachter Dispenser notwendig, welcher wesentlich günstiger zu realisieren ist. Die Kosten für einen Dispenser dieser Art belaufen sich auf ca. 30.000 – 50.000 Euro im Gegensatz zu einem Dispenser mit Kühlung, welcher ca. 120.000 Euro kostet. Dies gilt nicht nur für Gabelstapler, sondern auch für alle Fahrzeuge mit einem 350 bar Wasserstoff-Tanksystem.

Für größere Distanzen, und Betankungsanlagen wären Hochdruckpufferspeicher 500 bar vorzusehen. Diese haben den Vorteil, dass auf kleinem Raum eine große Menge an Wasserstoff gespeichert werden kann. Ein Großteil der Betankung kann bei diesen Pufferspeichern durch simples Überströmen realisiert werden, so dass an bestimmten Standorten kein Kompressor zur Betankung mehr notwendig ist. Wenn der Mindestdruck für die Überströmbetankung erreicht ist, wird der Container getauscht. Ein Nachteil daran ist, dass der Speicher öfters getauscht werden muss, der jedoch bei kurzen Distanzen in Kauf genommen werden kann.

¹⁵⁷ (85)

6.3.2 Kosten für den Transport und die Verteilung des erzeugten Wasserstoffs

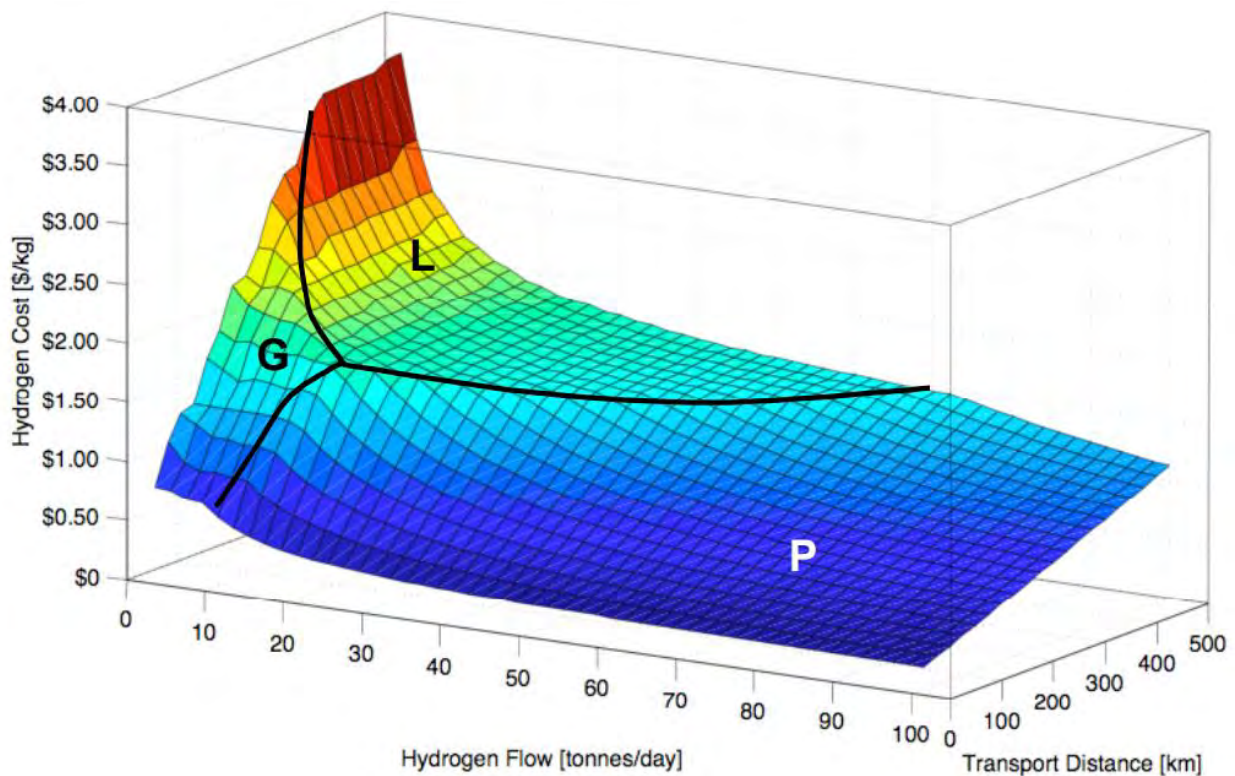


Abbildung 57: Transportkosten in \$/kg in Abhängigkeit der täglichen Transportmenge und der Transportdistanz. (P = Pipelinetransport; G = H₂ gasförmig auf LKW; L = H₂ flüssig auf LKW)¹⁵⁸

Für kurze Strecken und geringe Mengen Wasserstoff ist der Transport von gasförmigem Wasserstoff auf LKW zu bevorzugen. Die LKW-Lieferung hat im Vergleich zu den anderen Lieferarten geringe Kapitalinvestitionskosten für kleine H₂-Mengen. Die Hauptkostenfaktoren für diese Art des Wasserstofftransports sind Kapital- und Betriebskosten sowie die Wartung des LKW.

Für mittlere Mengen an Wasserstoff über lange Strecken wird die Lieferung flüssigen Wasserstoffs per LKW bevorzugt. Mit der Verflüssigungsanlage ist ein erheblicher Skaleneffekt verbunden. Die Kosten für die Lieferung per Flüssiggas-LKW hängen stark von den Kapital- und Stromkosten der Verflüssigungsanlage ab. Da die Kapazität des Flüssigwasserstoff-LKW viel höher ist als bei Druckgas-LKWs und die sonstigen Transportkosten (Personalkosten; Wartungskosten; Kraftstoffkosten; etc.) im Vergleich zum Druckgas-LKWs unverändert bleiben steigen die Kosten für Flüssiggas-LKW-Transporte nicht mit zunehmender Transportentfernung.

Für große Mengen an Wasserstoff wird die Pipeline-Lieferung bevorzugt. Der größte Kostenfaktor sind die Kapitalkosten der Pipeline, welche stark von der Transportdistanz und

¹⁵⁸ (65), S. 268-286

den Durchflussraten abhängig sind. Die Installationskosten steigen zudem mit zunehmendem Pipelinedurchmesser. Da aber die Kapazitätssteigerung einer Pipeline mit Vergrößerung des Durchmessers stark zunimmt, sinken die Kosten für den transportierten Wasserstoff mit zunehmendem Rohrdurchmesser rapide.¹⁵⁹

6.3.3 Investitionskosten für die Bereitstellung des Wasserstoffs

Flurförderfahrzeuge können über kleine Wasserstoff-Distributionstankstellen mittels Wasserstoff-Kartuschen betankt werden. Damit kann kostengünstig eine dezentrale Betankungs-Infrastruktur aufgebaut werden. Die Kosten einer solchen Wasserstoff-Distributionstankstelle liegen bei ca. 50.000 bis 100.000 Euro.

Dabei ist anzumerken, dass die Kosten der Tankstelle stark über die Anzahl der notwendigen Zapfsäulen (Dispenser) und der Anzahl an Fahrzeugen, die Back to Back (hintereinander) tanken definiert werden.

Tabelle 51: Investitionskosten für Wasserstoffbetankungsanlagen¹⁶⁰

Art der Betankungsanlage	Anschaffungskosten [€]	Bemerkungen
Tankstelle für Gabelstapler	50.000 - 100.000	ohne Hochdruck-Pufferspeicher
Tankstelle für 10 kg/Tag	150.000 - 180.000	
Tankstelle für 50 kg/Tag	500.000 - 600.000	
Tankstelle für 100 kg/Tag	ca. 1.2 Mio.	Quelle: H2 Mobility
Tankstelle für 600 kg/Tag	ca. 2.8 Mio.	gemäß Jive Anforderungen mit redundanten Kompressor-Einheiten
Tankstelle für 2.5 Tonnen/Tag	3.8 Mio.	
Tankstelle für 10 Tonnen/Tag	8.7 Mio.	

¹⁵⁹ (66)

¹⁶⁰ (85)

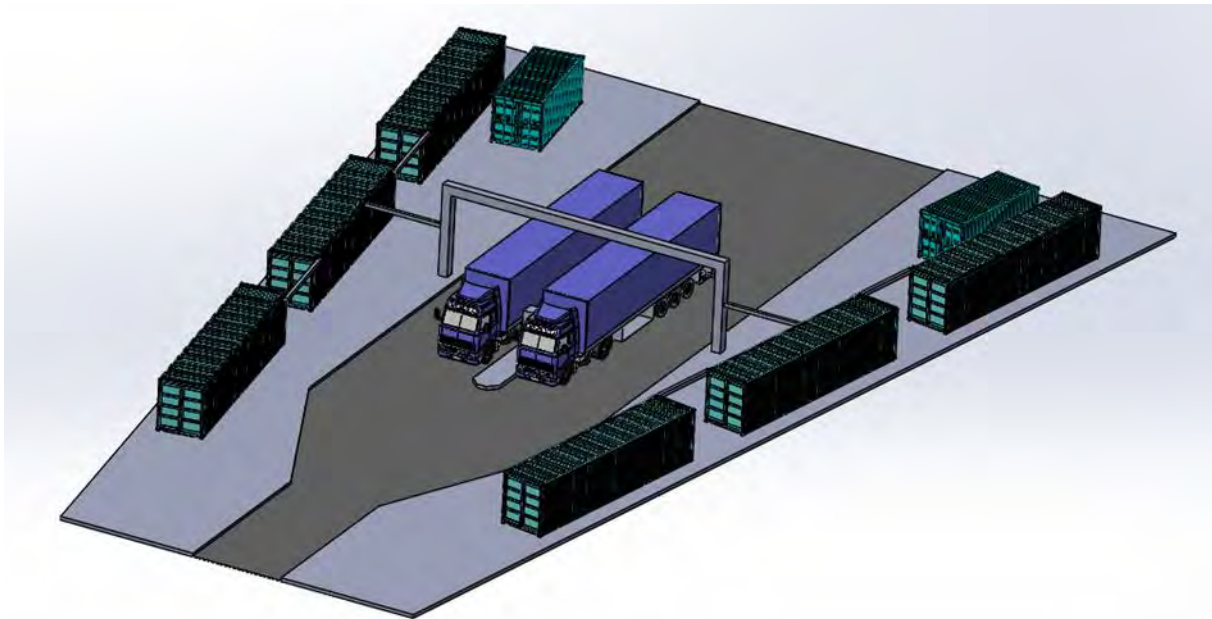


Abbildung 58: Beispiel einer Betankungsanlage als Containerlösung

Für großskalige Betankungsanlagen stellen containerbasierte Ansätze eine praktische Übergangslösung dar bis eine mögliche flächendeckende Pipelineversorgung der Tankstellenstandorte realisiert werden könnte. Hier ist die Anlieferung des Wasserstoffs und der Abtransport der leeren Tankcontainer über Sattelzugmaschinen möglich. Die in Abbildung 58 dargestellte Betankungsanlage für insgesamt 8.000 kg/Tag hat einen Platzbedarf von ca. 60 mal 40 Metern. Die Investitionskosten für die unterschiedlichen Betankungsanlagen sind der Tabelle 51 zu entnehmen. Es ist weiterhin anzumerken, dass ab einer Lagermenge > 3t eine Genehmigung nach BImSchG erforderlich ist.

6.3.4 Wirtschaftlichkeit der infrastrukturellen Maßnahmen

Investitionen in neue und noch nicht erprobte Fahrzeuge, Infrastrukturen und Gewerke ziehen Fragen zu der Wirtschaftlichkeit dieser Aktivitäten nach sich. Diese Fragen müssen im Rahmen der Investitionsplanung in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse beantwortet werden, welche nicht selten mit einem Testbetrieb der Anlagen, Fahrzeuge und Gewerken zur Datenerhebung und anschließenden Beurteilung einhergeht. Im Kern zielt eine Wirtschaftlichkeitsanalyse stets auf die vergleichende Bewertung unterschiedlicher Produkte ab. Dabei können je nach gewünschter Kennzahl unterschiedliche Parameter in die Betrachtung einfließen. So wird beispielsweise zwischen Kostenvergleichsrechnungen, Gewinnvergleichsrechnungen, Amortisationsrechnungen und Rentabilitätsrechnungen unterschieden. Daher macht es einen Unterschied, ob die Produktionskosten und die Verkaufserlöse eines Produkts oder die Investitionskosten für eine Maschine und die

Einnahmen aus ihrer Verwendung verglichen werden. Daher sind Prognosen beziehungsweise konkrete Informationen zu den Erträgen einer Investition in Infrastruktur neben den CAPEX und OPEX der zu vergleichenden Produkte eine wesentliche Messgröße. Da sich die in diesem Projekt zur Erstellung des Konzepts durchgeführte Datenerhebung ausschließlich auf die bestehenden Prozesse und Fahrzeuge bezogen und keine Testphase zur Erprobung alternativer Prozesse und Fahrzeuge stattgefunden hat, ist eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse zum Zeitpunkt dieser Konzepterstellung nicht möglich. Dennoch sind im Anschluss an dieses Projekt im Rahmen des Aufbaus eines Wasserstofftestfeldes in der Stadt Brake unter der Zuhilfenahme von Fördergeldern der Einsatz und die begleitende Untersuchung von Wasserstoffanwendungen geplant, in die auch die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffanwendungen fällt. Hierzu bieten sich die bereits genannten Machbarkeitsstudien an, die idealerweise zumindest zum Teil gefördert werden.

7 Fazit und weitere Vorgehen

Der Seehafen der Stadt Brake (Unterweser) ist auf dem Sektor des Getreide- und Futtermittelumschlags ein „Hidden Champion“ unter den deutschen Hafenstandorten. Gemessen an den Umschlagmengen im Getreide- und Futtermittelsektor und dem damit zusammenhängenden Verkehrsaufkommen gehört der Seehafen der Stadt Brake zu den stärksten Standorten auf europäischer Ebene und ist von überregionaler Bedeutung auf diesem Gebiet.

Eingebettet in die Metropolregion Nordwest und im Zentrum des Städtevierecks Bremen, Bremerhaven, Wilhelmshaven und Oldenburg ist der Hafen der Stadt Brake über die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße infrastrukturell trimodal mit den angrenzenden Ballungszentren vernetzt. Die vor Ort niedergelassenen Logistikunternehmen vereint in der Mehrheit die Verbundenheit zu aber auch die Abhängigkeit von dem Braker Hafen und dessen Resilienz gegenüber einer sich im Wandel befindlichen Wirtschaft. Die anhaltende Klimaerwärmung ist in diesem Fall der größte Treiber dieses Wandels. Die globalen Klimaschutzziele und die damit einhergehenden nationalen regulatorischen Maßnahmen verlangen besonders dem Logistiksektor erhebliche Anstrengungen ab. Ferner steht die Stabilität des Braker Hafens in direkten Zusammenhang mit der unternehmensseitigen Akzeptanz dieser regulatorischen Maßnahmen und der frühzeitigen Anpassung an die neuen Anforderungen.

Das vorliegende Konzept leistet einen wichtigen Beitrag zu diesem Transformationsprozess und schafft eine Planungsgrundlage, die die gemeinsame Umsetzung der Maßnahmen durch die Unternehmen ermöglicht. Es ist im Interesse aller beteiligten Akteure, dass die hierfür benötigten Entscheidungsprozesse in enger Zusammenarbeit auch mit den öffentlichen Stellen erfolgen und somit eine Planungssicherheit gewährleistet ist. Die Vernetzung und der Informationsaustausch mit parallellaufenden Wasserstoffprojekten in der Metropolregion Nordwest trägt durch die Schaffung von Synergien signifikant zu diesen Zielen bei.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das vorliegende Gesamtkonzept zielt darauf ab durch die Identifikation möglicher Wasserstoffanwendungsfelder und die Gestaltung der damit einhergehenden notwendigen Wasserstoffinfrastruktur einen Beitrag zu dem Transformationsprozess der Hafen- und Straßengüterlogistik der Stadt Brake hin zu einer klimaneutralen Zukunft zu leisten. Mit den gewonnenen Ergebnissen während den HyExpert-Prozessen und durch die frühzeitige

Integration der Logistikunternehmen der Stadt Brake in die Konzepterstellung konnte das unternehmerische Umfeld über die Wichtigkeit und Notwendigkeit eines zeitnahen Handelns auf dem Gebiet der Wasserstofftechnologie sensibilisiert werden. Gleichzeitig wurde die Eignung der Stadt Brake für die Integration einer Wasserstoffinfrastruktur anhand des vorhandenen Ausbaus erneuerbarer Energiequellen und der Identifikation vorhandener Flächen für die Installation der benötigten Infrastruktur festgestellt.

Dank der tatkräftigen Unterstützung der beteiligten Unternehmen wurden detaillierte Nutzungs- und Verbrauchsdaten zu insgesamt 380 Fahrzeugen der Fahrzeugtypen LKW, PKW, Flurförderfahrzeuge, Bagger, Schiffe, Krane und Sonderfahrzeuge zusammengetragen und ausgewertet. Mit 154 Einheiten entfällt die größte Teilmenge auf die LKW. Diese zeichnen sich für eine Anwendung der Wasserstofftechnologie insbesondere dadurch aus, dass sie ein starkes Treibhausgaseinsparpotential pro Fahrzeug vorweisen und überwiegend in Pendel- und Verteilertransporten im Nahverkehr eingesetzt werden. Damit ist im Falle einer Substitution dieser Fahrzeuge durch wasserstoffbetriebene LKW trotz des derzeit noch im Ausbau befindlichen Wasserstofftankstellennetzes ein Dauerbetrieb dieser LKW bereits über *eine* zentrale Wasserstofftankstelle möglich. Diese befindet sich im Rahmen des HyPerformer-Projekts Hyways for Future bereits in der Planung und wird in unmittelbarer Nähe zum Braker Hafen in eine „Tank & Rast“ Anlage integriert. Damit ist das vielzitierte Henne-Ei-Problem am Standort Brake nicht mehr existent.

Insgesamt konnte am Standort Brake ein jährlicher auf die untersuchten Fahrzeuge zurückführbarer Treibhausgasausstoß in Höhe von 29.359,65 t CO₂e quantifiziert werden. Nach Abzug der Emissionen, die auf die derzeit noch vorliegende Nutzung fossil erzeugten Stroms in elektrisch betriebenen Umschlaggeräten zurückzuführen sind, lassen sich in Brake durch die direkte Anwendung der Wasserstofftechnologie jährlich Treibhausgasemissionen in Höhe von 27.196,68 t CO₂e einsparen.

Zudem wurde mithilfe des Gesamtkonzepts ein anzustrebender Entwicklungsverlauf der Treibhausgasemissionen der erhobenen Fahrzeuge erarbeitet, mit dem ein Beitrag zum Erreichen der Emissionsziele im Verkehrssektor geleistet werden kann. Dieser Entwicklungsverlauf basiert auf die Empfehlungen der Agora Energiewende zur Treibhausgaseinsparung im Verkehrssektor bis zum Jahr 2045. In Kombination mit den Emissionswerten der einzelnen Fahrzeugtypen konnte der Entwicklungsverlauf auf die erhobenen Fahrzeuge übertragen werden, sodass daraus die notwendigen Fahrzeugs substitutionen kumulativ bis zum Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2045 hervorgehen. Dieses Ergebnis und das zugrundeliegende Vorgehen sind in dieser Form für die Stadt Brake einmalig und sowohl auf andere Bereiche der Mobilität als auch auf weitere Sektoren übertragbar. Gleichzeitig zeigen die Erkenntnisse auf, mit welchem Tempo der

Transformationsprozess zur Klimaneutralität über die Anschaffung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen vorangetrieben werden muss und dass ein weiteres Aufschieben konkreten Handelns die Erfolgchancen zum Erreichen der bundesdeutschen Klimaschutzziele senkt.

7.2 Weiteres Vorgehen in Bezug auf das etablierte Netzwerk

Bereits zu Beginn des Projekts H2BrakeCO2 wurde großer Wert auf die Vernetzung mit weiteren Wasserstoffinitiativen gelegt, in denen Schnittmengen zu den eigenen Projektzielen identifiziert werden konnten. Das HyLand-Netzwerk hat diesen Prozess deutlich beschleunigt und den Abgleich mit der bundesdeutschen Wasserstoffwirtschaft ungemein erleichtert. Mit dem HyLand Projekt Hyways for Future in unmittelbarer Nachbarschaft zur Stadt Brake liegen ideale Voraussetzungen für die Bildung von Synergien vor, welche besonders durch die Berücksichtigung der Stadt Brake bei der Standortwahl für eine Wasserstofftankstelle erkennbar sind. Die Ergebnisse aus dem Projekt H2BrakeCO2 haben signifikant zu dieser Entscheidung beigetragen. Prof. Wagner vom Berg leitet u.a. in Hyways for Future auch den Arbeitskreis „Güterlogistik“.

Ungeachtet der weiteren Planung und Finanzierung der konkreten Umsetzung dieses Gesamtkonzepts wird auch künftig der Kontakt zu bereits etablierten Netzwerken und Unternehmen aufrechterhalten, sodass die Grundlage für neue Projektideen und Kooperationen erhalten bleibt. Insbesondere die Beteiligung an den Arbeitsgruppen des bundesweiten „Forschungsnetzwerk Wasserstoff“ des Projektträgers Jülich als auch die Sichtbarkeit des Projekts H2BrakeCO2 im niedersächsischen Wasserstoff-Netzwerk erleichtern die Kommunikation und halten den Informationszufluss aufrecht.

7.3 Nächste Schritte

Aufbauend auf die Ergebnisse des HyExpert Projekts H2BrakeCO2 soll in der Stadt Brake ein Wasserstofftestfeld mit dem Fokus auf Straßengüterverkehr und Intralogistik im Hafenbereich entstehen. Neben der Erprobung von Wasserstoff-LKW sollen weitere konkrete Schritte mit der Erstellung von Machbarkeitsstudien bspw. zur Umrüstung von Umschlagsgeräten folgen, für die heute keine Serienfahrzeuge am Markt verfügbar sind. Dadurch werden schwere Flurförderfahrzeuge und leistungsstarke Bagger frühzeitig an die Wasserstofftechnologie herangeführt. Die Zusammenarbeit mit Hochschulen und angegliederten Instituten wie dem Smart Mobility Institute der Hochschule Bremerhaven, die die Erstellung dieser Machbarkeitsstudien federführend begleiten, ermöglicht den Unternehmen die

Inanspruchnahme von Fördergeldern, ohne dass die Bereitstellung zusätzlichen Personals erforderlich ist. Erfahrungsgemäß sind viele Unternehmen gegenüber der Beantragung von Fördergeldern aufgrund des damit einhergehenden großen organisatorischen Aufwandes gehemmt. Daher würde eine Zusammenarbeit mit Hochschulen maßgeblich zur Marktaktivierung beitragen und diese beschleunigen.

Der Aufbau eines Wasserstofftestfeldes zur Erprobung von Wasserstoff-LKW hat einen ähnlichen Effekt auf die Unternehmen der Region. Gemeinsame Fahrzeuganschaffungen durch mehrere Logistikunternehmen erleichtern den organisatorischen und fördertechnischen Arbeitsaufwand des einzelnen und gewährleisten die Planungssicherheit von Investoren, die den Aufbau der notwendigen Infrastruktur mitfinanzieren. Gleichzeitig sinken die Anschaffungskosten der Fahrzeuge durch die Bündelung von Bestellungen. Die Stadt Brake hat sich in diesem Zusammenhang von Beginn an als starker Enabler herausgestellt und Bürgermeister Michael Kurz fördert aktiv die Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft in Brake.

7.4 Akzeptanz und Öffentlichkeitsarbeit / Erfolgsfaktoren

Themen wie Umweltschutz, Energiewende, Mobilitätswende und Sektorenkopplung haben durch den anhaltenden menschengemachten Klimawandel stark an gesellschaftlicher Popularität hinzugewonnen und sind aus der Politik nicht mehr wegzudenken. Mit der Unterzeichnung des Pariser Klimaschutzabkommens hat sich die Weltöffentlichkeit zum Klimaschutz bekannt und die Nichtüberschreitung der Erderwärmung um 1,5 Grad zum festen Ziel festgelegt. Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung soll zum Erreichen dieser Ziele ihren Beitrag leisten und hat nicht zuletzt auch dieses Projekt ermöglicht. Die Reaktionen auf das Projekt H2BrakeCO₂ seitens der niedersächsischen Politik, der Braker Wirtschaft und der Bürgerinnen und Bürger der Stadt sind positiv zu resümieren, auch wenn die Maßnahmen zur Bekämpfung der Covid-19-Pandemie einen direkten Bürgerdialog nicht erlaubt haben.

Der laufende Austausch mit den Bürgerinnen und Bürgern sowie den Unternehmen ist für den Erfolg des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft und für die Akzeptanz der damit verbundenen finanziellen Belastung der Unternehmen und der Inanspruchnahme von Steuergeldern zur Finanzierung von Projekten wie H2BrakeCO₂ von fundamentaler Bedeutung. Gleichzeitig muss der ausgereifte technologische Entwicklungsstand vermittelt werden, um Hemmnisse und Vorurteile gegenüber dem Energieträger Wasserstoff aufzuklären. Die an dem Projekt beteiligten Vereine H2BX e.V. und Automotive Northwest e.V. leisten einen großen Beitrag zu eben dieser Öffentlichkeits- und Aufklärungsarbeit.

Eine erfolgreiche Öffentlichkeitsarbeit ist insbesondere für die Umsetzung der erarbeiteten Ergebnisse aus dem vorliegenden Konzept ein wichtiger Erfolgsgarant und vermeidet Planungsfehler, die auf eine unzureichende Kommunikation mit den Endverbrauchern und Unternehmen zurückzuführen sind. Daher wird auch weiterhin die öffentlichkeitswirksame Kommunikation und Vermittlung von weiteren Planungsschritten und Zwischenergebnissen angestrebt.

7.5 Übertragbarkeit auf andere Regionen

Ein wichtiges Charakteristikum in dem vorliegenden Gesamtkonzept ist die Übertragbarkeit des Vorgehens und der Ergebnisse auf andere Regionen mit ähnlichen Grundvoraussetzungen wie sie der Hafenstandort Brake vorweist.

Diese Prämisse zieht sich von der Erhebung der Daten über die Verarbeitung und Auswertung dieser bis zu der Erarbeitung der Umsetzungspläne zur Einhaltung der Klimaschutzziele durch das gesamte Konzept. Bei der Erstellung der Umsetzungspläne wurde auf Basis der Empfehlungen der Agora Energiewende zur Reform des Klimaschutzgesetzes gearbeitet. Die darin festgehaltenen angepassten Treibhausgaseinsparziele sind von nationaler Tragweite und gelten für jede Region und jeden Sektor der BRD. Durch die Anwendung dieser allgemeingültigen Treibhausgaseinsparziele und der Übertragung auf die untersuchten Prozesse wurde eine willkürliche Festlegung von Zielen vermieden, mit denen sich andere Standorte oder Regionen möglicherweise nicht identifizieren können. Damit konnte dem Anspruch eines Blaupausencharakters dieses Konzepts für andere Hafen- und Logistikstandorte Rechnung getragen werden.

8 Literaturverzeichnis

1. **Statistisches Bundesamt.** Umweltnutzung und Wirtschaft - Teil 5: Verkehr und Umwelt. [Online] 23. Oktober 2019. [Zitat vom: 02. September 2020.] <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/verkehr/Publikationen/Downloads/umweltnutzung-und-wirtschaft-tabelle-5850007197006-teil-5.html>.
2. **Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU).** Hydrogen Roadmap Europe –A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. [Online] Januar 2019. [Zitat vom: 02. September 2020.] https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf..
3. **Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.** Bundeswasserstraßenkarten. [Online] Oktober 2019. [Zitat vom: 04. September 2020.] https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/service/karten/01_karten/karten-node.html.
4. **DB.** Infrastrukturregister. [Online] [Zitat vom: 04. September 2020.] <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr>.
5. **J. Müller AG.** Seehafen Brake Übersichtsplan. [Online] [Zitat vom: 04. September 2020.] https://www.seaports.de/data/files/230/faltblatt_hafenplan_brake_2_DE.pdf.
6. **Niedersachsen Ports.** Brake - Spezialhafen an der Weser. [Online] [Zitat vom: 04. September 2020.] <https://www.nports.de/haefen/brake/>.
7. **J. Müller.** VIEL PLATZ FÜR IHR BUSINESS. [Online] 2020. [Zitat vom: 14. September 2020.] <https://jmueller.de/flachenvermarktung/>.
8. **Niedersachsen Ports.** NPorts Imagebroschüre - Seehafen Brake. [Online] 2020. [Zitat vom: 18. September 2020.] https://www.nports.de/media/Haefen/Brake/NPorts_Imagebroschuere_Seehafen_Brake.pdf.
9. **J. Müller.** J. Müller - Nautische und Technische Daten. [Online] [Zitat vom: 18. September 2020.] <https://jmueller.de/unternehmensgruppe/nautische-technische-daten/>.
10. —. J. MÜLLER - Eine Gruppe, viele Spezialisierungen . [Online] [Zitat vom: 18. September 2020.] <https://jmueller.de/unternehmensgruppe/konzernstruktur/>.
11. **L.I.T. AG.** Unternehmen - Die L.I.T. Unternehmensgruppe stellt sich vor. [Online] [Zitat vom: 21. September 2020.] <https://www.lit.de/unternehmen/>.
12. **OOWV.** Wasser: unser Element. [Online] 2016. [Zitat vom: 21. September 2020.] https://www.oowv.de/fileadmin/user_upload/2011/downloads/OOWV_Broschuere_2016.pdf.
13. **Albers Transport & Logistik GmbH.** WILLKOMMEN BEI ALBERS LOGISTIK. [Online] [Zitat vom: 21. September 2020.] <https://www.albers-logistik.de/index.php/de/>.
14. **DMK Deutsches Milchkontor GmbH.** Wer wir sind . [Online] [Zitat vom: 21. September 2020.] <https://www.dmk.de/wer-wir-sind/>.

15. **Fleming + Wendeln** . Unternehmen Fleming + Wendeln. [Online] [Zitat vom: 22. September 2020.] <https://fleming-wendeln.de/unternehmen.php>.
16. **Biewald, Anja nach Hohmann, Thomas**. KRAFTWERK IN HUNTORF - Die Vision der Zukunft ist aus Wasserstoff. [Online] NWZ Online, 08. Oktober 2019. [Zitat vom: 22. September 2020.] https://www.nwzonline.de/wesermarsch/wirtschaft/huntorf-kraftwerk-in-huntorf-die-vision-der-zukunft-ist-aus-wasserstoff_a_50,6,168797013.html.
17. **Wirtschaftsförderung Wesermarsch**. Gewerbeflächenbroschüre. [Online] Februar 2020. [Zitat vom: 14. September 2020.] https://www.wesermarsch.de/downloads-1403.html?file=files/Downloads/Gewerbeflaechenbroschuere_Stand%20April%202021.pdf.
18. **flosm**. Stromnetz. [Online] [Zitat vom: 01. Juni 2021.] <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html?lat=53.3789681&lon=8.46482585&r=41555.922&st=0&sw=powercable,powerline,powerline110k,powerline115k,powerline20k,powerline220k,powerline220v,powerline225k,powerline30k,powerline380k,powerline3k,powerline400k,powerline400v>.
19. **NOW GmbH**. Sektorenkopplung mit Wasserstoff. [Online] [Zitat vom: 01. Juni 2021.] <https://www.now-gmbh.de/sektoren-themen/sektorenkopplung/>.
20. **IHK Nord**. Norddeutsche Wasserstoffkarte. [Online] [Zitat vom: 01. Juni 2021.] <https://www.ihk-nord.de/grafiken/karte-nd-h2-projekte-2020-legende-4946380>.
21. **Stadt Fulda**. BAHN FREI FÜR WASSERSTOFF: START DES HYWHEELS. [Online] [Zitat vom: 01. Juni 2021.] <https://www.fulda.de/news/detail/bahn-frei-fuer-den-wasserstoff-start-des-projekts-hywheels-1000-brennstoffzellen-fahrzeuge-fuer-osthessen-als-ziel.html>.
22. **Future Mobility** – konkrete Projektentwicklung für eine Wasserstoffwirtschaft in Nordostniedersachsen. [Online] [Zitat vom: 01. Juni 2021.] <https://www.h2non.de/#h2lastverkehr>.
23. **EnergieSynergie**. Strategiekonzept zur Neuausrichtung der zukünftigen grünen Energiewirtschaft im Landkreis Wesermarsch. [Online] 14. Mai 2020. [Zitat vom: 15. Juni 2021.] <https://wesermarsch.de/downloads-1403.html?file=files/Downloads/Strategiekonzept%20Energiewirtschaft%20Wesermarsch.pdf>.
24. **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie**. Deutsche Klimaschutzpolitik. [Online] 2021. [Zitat vom: 24. Juni 2021.] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html>.
25. **Hydrogentle GmbH**. *Konzept zur Nutzung von Wasserstoff in Cuxhaven und im Elbe-Weser-Raum*. Hamburg : s.n., 2019.
26. **DB Cargo AG**. Ganzzugverkehr: Ihre Wahl für große Mengen. [Online] [Zitat vom: 24. Juni 2021.] <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/leistungen/schienentransporte/Ganzzug>.
27. **GS Agri eG**. GS Agri - Stärken. [Online] [Zitat vom: 24. Juni 2021.] <https://www.gs-agri.de/gsagri/staerken.html>.

28. Umweltbundesamt. Wie viele Schiffe sind weltweit auf den Meeren unterwegs? [Online] 06. Juni 2019. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-viele-schiffe-sind-weltweit-auf-den-meeren>.

29. Wikipedia. Prinzip der Landstromversorgung. [Online] 27. Mai 2021. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] https://de.wikipedia.org/wiki/Cold_Ironing.

30. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie . Memorandum of Understanding über die Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Nutzung von Landstrom in Häfen. [Online] 10. Oktober 2019. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/memorandum-nutzung-von-landstrom.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

31. International Transport Forum at the OECD. Shipping Emissions in Ports. [Online] Dezember 2014. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201420.pdf>.

32. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. IMO beschließt Strategie zur Reduktion von CO₂-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt. [Online] [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/reduktion-emissionen-internationale-seeschifffahrt.html>.

33. Niedersachsen Ports. Expertenbefragung unter Verwendung eigens dafür erstellter Fragebögen. Brake : s.n., 2020.

34. Öko-Institut e.V. Bezug von Landstrom durch Schiffe: Bewertung in der Klimabilanzierung. [Online] 30. Oktober 2019. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/EE-Bezug-Landstrom.pdf> .

35. Statistisches Bundesamt. Güterumschlag nach Häfen, Verkehrsbeziehungen und Berichtszeiträumen. [Online] Dezember 2018. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://zds-seehaefen.de/wp-content/uploads/2019/05/Seeschifffahrt-2018-12-Umschlag-nach-H%C3%A4fen.pdf>.

36. Windkraftscout. Wie viel Energie erzeugt eine Windkraftanlage pro Jahr? [Online] 27. Januar 2013. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <http://www.windkraftscout.de/wie-viel-energie-erzeugt-eine-windkraftanlage-pro-jahr/>.

37. Bundesnetzagentur. EEG-Statistikberichte und "EEG in Zahlen" 2006 bis 2018. [Online] 31. Dezember 2018. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEGinZahlen_2018.xlsx?__blob=publicationFile&v=2.

38. —. Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018. [Online] 01. August 2019. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Quartalsbericht_Q4_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

39. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Kurzinformation Elektromobilität bzgl. Strom- und Ressourcenbedarf. [Online] [Zitat vom: 30. Juni 2021.]

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_strom_ressourcen_bf.pdf.

40. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Woher soll der Grüne Wasserstoff kommen? [Online] 20. Mai 2021. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.bmbf.de/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen-11766.html>.

41. Toyota. MIRAI BASIS - LIMOUSINE. [Online] [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.toyota.de/automobile/mirai/>.

42. Hyundai. Der Hyundai NEXO. [Online] [Zitat vom: 30. Juni 2021.] <https://www.hyundai.de/modelle/nexo/>.

43. Prognos AG im Auftrag der Agora Energiewende und der Stiftung Klimaneutralität. Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. [Online] April 2021. [Zitat vom: 30. Juni 2021.] https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/04/2021_KNDE2045_Zusammenfassung_DE.pdf.

44. Lloyd's Register. ISO 50001 Energie Management System. [Online] [Zitat vom: 07. Juli 2021.] https://www.lr.org/de-de/ressourcen/iso-50001/?creative=417602844658&keyword=iso%2050001&matchtype=p&network=g&device=c&gclid=EAlaIQobChMI5tzc3OjS7gIVQvBRCh0HXgH6EAAYAAEgJR6PD_BwE.

45. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. [Online] März 2013. [Zitat vom: 07. Juli 2021.] [https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/\\$file/DSLV-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf](https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/$file/DSLV-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf).

46. Statista. Entwicklung des CO2-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019. [Online] April 2020. [Zitat vom: 07. Juli 2021.] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>.

47. Royal Dutch Shell Ltd. Shell GTL Fuel Benefits Guide. [Online] [Zitat vom: 27. August 2021.] https://www.mogler-oil.de/fileadmin/Daten/PDF-Dokumente/Shell_GTL_Fuel_Benefits_Guide_vDE.PDF.

48. Die Bundesregierung. Klimaschutzgesetz 2021 - Generationenvertrag für das Klima. [Online] 12. Juli 2021. [Zitat vom: 2021. August 27.] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>.

49. Agora Energiewende. Sechs Eckpunkte für eine Reform des Klimaschutzgesetzes. [Online] 2021 Mai. [Zitat vom: 27. August 2021.] https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_212_Eckpunkte-Klimaschutzgesetz-2021_WEB_01.pdf.

50. Die Bundesregierung . Klimaschonender Verkehr. [Online] 2021. [Zitat vom: 27. August 2021.] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschonender-verkehr-1794672>.

- 51. Wasserstoff gehört die Zukunft – Hamburgs Speditions- und Logistikfirmen setzen auf alternative Lkw-Antriebe.** THB Täglicher Hafenbericht. Nr. 72, 2019.
- 52. Fraunhofer ISL, Öko-Institut, ifeu. Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr - Handlungsempfehlungen für Deutschland.** 2018.
- 53. ANLEG GmbH.** Marktanalyse der Firma ANLEG GmbH im Auftrag der Stadt Brake .
- 54. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.** Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare. [Online] 18. August 2021. [Zitat vom: 13. September 2021.] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/richtlinie-KsNI.html>.
- 55. mobile.de. mobile.de.** [Online] 2021. [Zitat vom: 13. September 2021.] <https://suchen.mobile.de/fahrzeuge/search.html?con=NEW&fr=2021%3A&isSearchRequest=true&ms=25100%3B%3B%3B%3B&s=Truck&vc=SemiTrailerTruck>.
- 56. Toll Collect.** Mautbefreiung für Lkw mit alternativen Antrieben. [Online] 03. April 2019. [Zitat vom: 14. September 2021.] <https://toll-collect-blog.de/mautbefreiung-fuer-lkw-mit-alternativen-antrieben/>.
- 57. —.** Das neue Jahr bringt neue Tarife für die Lkw-Maut. [Online] 18. Februar 2018. [Zitat vom: 14. September 2021.] <https://toll-collect-blog.de/das-neue-jahr-bringt-neue-tarife-fuer-die-lkw-maut/>.
- 58. Das Umweltbundesamt.** Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. [Online] Dezember 2020. [Zitat vom: 15. September 2021.] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>.
- 59. tagesschau.de.** Kosten könnten zehn Milliarden Euro betragen. [Online] 30. Juli 2021. [Zitat vom: 16. September 2021.] <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/finanzen/hochwasser-schaeden-kosten-101.html>.
- 60. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.** Bekanntmachung der Neufassung der Förderrichtlinie für Maßnahmen der Marktaktivierung im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2. [Online] 5. Juli 2021. [Zitat vom: 16. September 2021.] <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/NIP-II-Foerderrichtlinie-Marktaktivierung-2021.pdf>.
- 61. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.** [Online] 2021. Juli 2021. [Zitat vom: 16. September 2021.] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/077-scheuer-foerderrichtlinie-nutzfahrzeuge-alternative-antriebe.html?nn=13326>.
- 62. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität.** ROADMAP PTX - ARBEITSGRUPPE 5 VERKNÜPFUNG DER VERKEHRS- UND ENERGIENETZE, SEKTORKOPPLUNG. [Online] Oktober 2019. [Zitat vom: 17. September 2021.] https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/10/NPM_Bericht_AG-5_Roadmap-PtX_ly02.pdf.

- 63. H-TEC SYSTEMS GmbH.** H-TEC SYSTEMS Hochleistungs- Elektrolyseure: Ready. Set. Supply. [Online] [Zitat vom: 17. September 2021.] <https://www.h-tec.com/produkte/>.
- 64. ANLEG GmbH.** Vertriebsgespräch zwischen der ANLEG GmbH und Nel ASA.
- 65. Yang, C. and J. Ogden.** Determining the lowest-costs hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007, Bd. 32, 2Yang, C. and J. Ogden.
- 66. Roads2HyCom** - Aude Cuni et. al. LINKING DISTRIBUTED EUROPEAN HYDROGEN PRODUCTION SOURCES PART I: Distribution Issues. [Online] 19. Juni 2008. [Zitat vom: 17. September 2021.] https://www.researchgate.net/publication/237698031_HYDROGEN_PRODUCTION_SOURCES_PART_I_Distribution_Issues.
- 67. Fachagentur Windenergie an Land e.V.; Jürgen Quentin et.al.** Was tun nach 20 Jahren? Repowering, Weiterbetrieb oder Stilllegung von Windenergieanlagen nach Förderende. [Online] 28. Juni 2018. [Zitat vom: 05. November 2021.] windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Was_tun_mit_WEA_nach_20Jahren.pdf .
- 68. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie** . Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. [Online] 23. September 2020. [Zitat vom: 05. November 2021.] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzentwurf-aenderung-erneuerbare-energien-gesetzes-und-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.html>.
- 69. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE.** Verordnung zur Umsetzung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021 und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften. [Online] 19. Mai 2021. [Zitat vom: 05. November 2021.] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/verordnung-zur-umsetzung-des-eeg-2021-und-zur-aenderung-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.html>.
- 70. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.** Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. *Gesetze im Internet*. [Online] 01. Januar 2021. [Zitat vom: 05. November 2021.] https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/.
- 71. EWE GASSPEICHER GmbH.** Hyways for Future - Das Projekt. [Online] [Zitat vom: 09. November 2021.] <https://www.hyways-for-future.de/projekt.html>.
- 72. EWE Aktiengesellschaft.** "Clean Hydrogen Coastline" jetzt auf europäischer Ebene. [Online] 28. Mai 2021. [Zitat vom: 28. November 2021.] <https://www.ewe.com/de/presse/pressemitteilungen/2021/05/clean-hydrogen-coastline-jetzt-auf-europischer-ebene-ewe-ag>).
- 73. ew** - Magazin für die Energiewirtschaft. Clean Hydrogen Coastline als Grundstein für eine europäische Wasserstoffwirtschaft. [Online] 24. März 2021. [Zitat vom: 09. November 2021.] <https://www.energie.de/ew/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/clean-hydrogen-coastline-als-grundstein-fuer-eine-europaeische-wasserstoffwirtschaft>.
- 74. swb AG.** Norddeutscher Grundstein für europäische Wasserstoffwirtschaft. [Online] [Zitat vom: 09. November 2021.] <https://www.swb.de/ueber-swb/unternehmen/nachhaltigkeit/wasserstoff/clean-hydrogen-coastline>.

- 75. Wirtschaftsförderung Wesermarsch.** Energiewendedrehkreuz Wesermarsch. [Online] [Zitat vom: 09. November 2021.] <https://energieregion-wesermarsch.de/projekte/energiewendedrehkreuz-wesermarsch/>.
- 76. Christoph Buchal et. al.** Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO2-Bilanz? [Online] 2019. April 2019. [Zitat vom: 14. September 2021.] <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25.pdf>.
- 77. Matthes et. al.** *Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland – Untersuchung für die Stiftung Klimaneutralität.* Öko-Institut. 2021.
- 78. eCap Mobility GmbH.** Vertriebsgespräch zwischen eCap Mobility GmbH und J.Müller Weser AG.
- 79. Toyota Europe.** Vertriebsgespräch zwischen ANLEG GmbH und Toyota Europe. Juli 2021.
- 80. Plug Power Inc.** Vertriebsgespräch zwischen ANLEG GmbH und Plug Power Inc. Juli 2021.
- 81. KION GROUP AG.** Vertriebsgespräch zwischen ANLEG GmbH und KION GROUP AG. Juli 2021.
- 82. Volvo Group.** Vertriebsgespräch zwischen ANLEG GmbH und der Volvo Group. Juli 2021.
- 83. Reuschling GmbH & Co. KG.** Vertriebsgespräch zwischen ANLEG GmbH und Reuschling GmbH & Co. KG. Juli 2021.
- 84. Deutsche Energie-Agentur (dena).** Abschlussbericht: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. [Online] Oktober 2021. [Zitat vom: 03. Dezember 2021.] <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/abschlussbericht-dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>.
- 85. Marktanalyse der ANLEG GmbH.** 2021.
- 86. Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.** Dieselpreis-Information (Großverbraucher). [Online] 19. November 2021. [Zitat vom: 07. Dezember 2021.] <https://www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation.pdf>.
- 87. Green Car Congress .** Hyzon Motors delivers first hydrogen-powered truck to multinational dairy, signs deal with Coregas in Australia. [Online] 15. Juli 2021. [Zitat vom: 08. Dezember 2021.] <https://www.greencarcongress.com/2021/07/hyzon-motors-delivers-first-hydrogen-powered-truck-to-multinational-dairy-signs-deal-with-coregas-in.html>.
- 88. NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.** HYZON HyMax-250/450. [Online] 2021. [Zitat vom: 08. Dezember 2021.] <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/hyzon-hymax-250-450/>.
- 89. The Asahi Shimbun.** Kawasaki Heavy builds world's first tanker for liquid hydrogen. [Online] 25. Mai 2021. [Zitat vom: 09. Dezember 2021.] <https://www.asahi.com/ajw/articles/14357692>.

- 90. DS Consulting GmbH.** Wasserstoff aus Schottland. [Online] 2021. [Zitat vom: 09. Dezember 2021.] <https://www.schottland.de/hydrogen-in-scotland/>.
- 91. HZwei - Hydrogeit Verlag.** Vom Pionier zum Nachzügler. [Online] 04. Dezember 2019. [Zitat vom: 09. Dezember 2021.] <https://www.hzwei.info/blog/2019/12/04/vom-pionier-zum-nachzuegler/>.
- 92. Heinrich-Böll-Stiftung e.V. Grüner Wasserstoff aus Marokko – keine Zauberformel für Europas Klimaneutralität.** [Online] 20. Januar 2021. [Zitat vom: 20. Dezember 2021.] <https://www.boell.de/de/2021/01/20/gruener-wasserstoff-aus-marokko-keine-zauberformel-fuer-europas-klimaneutralitaet>.
- 93. EWE Aktiengesellschaft.** EWE und Uniper planen Wasserstoffhub am Standort Huntorf. [Online] 23. April 2021. [Zitat vom: 09. Dezember 2021.] <https://www.ewe.com/de/presse/pressemitteilungen/2021/04/ewe-und-uniper-planen-wasserstoffhub-am-standort-huntorf-ewe-ag>.
- 94. Oldenburgisch Ostfriesischer Wasserverband - OOWV.** Papierflieger landet im Landkreis Wesermarsch: OOWV gewinnt NachhaltigkeitsAward Nordwest 2020. [Online] 26. Mai 2020. [Zitat vom: 10. Dezember 2021.] <https://www.metropolregion-nordwest.de/portal/meldungen/papierflieger-landet-im-landkreis-wesermarsch-ooov-gewinnt-nachhaltigkeitsaward-nordwest-2020-900000235-10018.html>.
- 95. BASF SE.** Chemie, die verbindet. *www.basf.com*. [Online] 2015. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] https://www.basf.com/global/images/about-us/history/BASF-Geschichte_Chemie-die-verbindet-1865-2015.pdf.
- 96. MotorShip.** Innovative components for first methanol drive research ship. *www.motorship.com*. [Online] 2020. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://www.motorship.com/news101/alternative-fuels/germans-order-first-methanol-drive-research-ship>.
- 97. CPL, Competence in Ports and Logistics; SL, Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik.** LNG-Marktentwicklungs- und Nachfragepotentialanalyse für die Schifffahrt sowie weitere LNG-affine Verkehrsträger in Bremerhaven und Bremen. *bremenports.de*. [Online] 2015. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] https://bremenports.de/unternehmen/wp-content/uploads/sites/2/2017/04/2016_LNG-Potenzialanalyse_bremische_Haefen.pdf.
- 98. ABS, American Bureau of Shipping.** Methanol as Marine Fuel - Sustainability Whitepaper. *safety4sea.com*. [Online] 2021. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2021/02/Sustainability-Methanol-as-Marine-Fuel.pdf?__cf_chl_jschl_tk__=394e58f986e29eb31efb77b6a79c0632c5d81117-1622121425-0-.AYOktpjARo7BUDFgr3nhiWdSWuVdw4Q_wk9rhjZdVBEkC3gcJOqOCiYB6UoIUHohhpVJ4tEclJ61nyqql.
- 99. DIHK Service GmbH.** Praxisleitfaden Betriebliches Mobilitätsmanagement. *www.mittelstand-energiewende.de*. [Online] DIHK Service GmbH. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] https://www.mittelstand-energiewende.de/fileadmin/user_upload_mittelstand/MIE_vor_Ort/MIE-Praxisleitfaden_Betriebliches_Mobilit%C3%A4tsmanagement.pdf.

- 100. INWL, Institut für nachhaltige Wirtschaft und Logistik.** *Potenzialanalyse Methanol als emissionsneutraler Energieträger für Schifffahrt und Energiewirtschaft.* Rostock, Elsfleth : s.n., 2018.
- 101. MAN Diesel & Turbo.** Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series. *www.mandieselturbo.com* . [Online] 2014. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://www.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocuments/using-methanol-fuel-in-the-man-b-w-me-lgi-series.pdf>.
- 102. Green Maritime Methanol.** System Design for Short Sea Shipping - Six Case Studies of Ships Using Methanol as A Fuel. [Online] 2020. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://publications.tno.nl/publication/34637752/GPkj6y/TNO-2021-green.pdf>.
- 103. Bertau, M., et al.** *Methanol - der Kraftstoff, der uns morgen antreibt.* Berlin : Springer Vieweg, 2019.
- 104. International Maritime Organization.** *Fourth IMO GHG Study 2020, Executive Summary.* s.l. : International Maritime Organization, 2020.
- 105. Andersson, K. und Salazar, C.** Methanol as a Marine Fuel Report. *www.methanol.org*. [Online] 2015. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>.
- 106. Brynolf, S., Fridell, E. und Andersson, K.** *Environmental Assessment of Marine Fuels: Liquefied Natural Gas, Liquefied Biogas, Methanol and Bio-Methanol.* *Journal of Cleaner Production.* 2014.
- 107. Bos, M., Kersten, S. und Brilman, D.** *Wind Power to Methanol: Renewable Methanol Production Using Electricity, Electrolysis of Water and CO2 Air Capture.* s.l. : Applied Energy , 2020.
- 108. Chatterton, C.** *Methanol As A Marine Fuel.* Singapur, Washington, Brüssel, Peking, New Delhi : Methanol Institute (Hrsg.), 2021.
- 109. Ellis, J. und Tanneberger, K.** Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. *eibip.eu*. [Online] 2015. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://eibip.eu/wp-content/uploads/2018/01/Study-on-the-use-of-ethyl-and-methyl-alcohol-as-alternative-fuels.pdf>.
- 110. Frei, Anna - Maria.** *Konzeptionierung der Nutzung von grünem Methanol für den klein- und mittelgroßen Schiffsverkehr am Beispiel der Stadt Brake (Unterweser) für CO2-freie Hafen- und Logistikprozesse.* Bremerhaven : Hochschule Bremerhaven, 2021.
- 111. ISE, Fraunhofer.** Nachhaltiger Chemischer Speicher: Konversion von CO2 und H2 zu Methanol. *www.ise.fraunhofer.de*. [Online] 2021. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/konversion-von-co2-und-h2-zu-methanol-als-nachhaltigem-chemischen-energiespeicher.html>.
- 112. Keller, Sarah.** *statista.de*. [Online] 18. März 2021. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/325459/umfrage/nutzungsdauer-schiffe-container-von-hapag-lloyd/>.

- 113. Köhler, J., et al.** *Studie über die Markt- reife von Erdgasmotoren in der Binnen-und Seeschifffahrt. Teilstudie als Wissen- schaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts-und Kraftstoffstrategie.* Karlsruhe : s.n., 2018.
- 114. Kreidelmeyer, S., et al.** *Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger.* Basel : Prognos AG (Hrsg.), 2020.
- 115. Lasselle, S. und Abusdal, H.** Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and and economic feasibility. *www.methanol.org.* [Online] 2016. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IMO- Methanol-Marine-Fuel-21.01.2016.pdf>.
- 116. Line, Stena.** Stena Germanica. *www.stenaline.com.* [Online] 2021. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://www.stenaline.com/about-us/our-ships/stena-germanica/>.
- 117. Meyer, Johannes, et al.** Energetische und wirtschaftliche Betrachtung einer dezentralen Methanolsynthese zur Speicherung von Erneuerbaren Energien. *www.tugraz.at.* [Online] Februar 2014. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/lf/LF_Meyer.pdf.
- 118. Mittelbach, M.** Methanolgewinnung aus Biogas. *www.noest.or.at.* [Online] Netzwerk Öko-Energie Steiermark, 2005. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] http://www.noest.or.at/intern/dokumente/076_Enbericht_Methanolstudie.pdf.
- 119. Olah, G. A., Goeppert, A. und Parkash, G. S.** *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy.* Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2018.
- 120. Organization, International Maritime.** *Fourth IMO GHG Study 2020, Executive Summary.* London : International Maritime Organization, 2020.
- 121. Sinclair, C.** Methanol advances as alternative bunker fuel with barge-to-ship operation. *www.maritime-executive.com.* [Online] 2021. [Zitat vom: 8. Dezember 2021.] <https://www.maritime- executive.com/article/waterfront-shipping-orders-eight-additional-methanol-dual- fuel-vessels>.

Anhang I

Installierte Windenergieanlagen in der Wesermarsch

	Anzeige-Name der Einheit	Nettonenn- leistung der Einheit	Inbetrieb- nahme- datum der Einheit	Registrie- rungsdatum der Einheit	Ort
1	826186	2300	25.03.2015	12.07.2019	Berne
2	826184	2300	18.03.2015	12.07.2019	Berne
3	826188	2300	25.03.2015	13.06.2019	Berne
4	826187	2300	31.03.2015	12.07.2019	Berne
5	KA_Berne_Win d_01	75	30.11.1990	02.10.2020	Berne
6	826183	2300	30.04.2015	12.07.2019	Berne
7	826185	2300	26.03.2015	12.07.2019	Berne
8	WEA 2 (Windpark Golzwarden)	3050	27.07.2017	03.09.2019	Brake
9	HAM 3 -301348	3370	06.02.2018	13.05.2020	Brake
10	WEA 3 (Windpark Golzwarden)	3050	30.06.2017	03.09.2019	Brake
11	WEA 4 (Windpark Golzwarden)	3050	19.07.2017	03.09.2019	Brake
12	KA_Brake_Win d_01	800	08.06.2013	01.10.2020	Brake
13	V 16757-05	2000	18.02.2003	16.12.2020	Brake
14	WEA 6 (Windpark Golzwarden)	3050	22.06.2017	03.09.2019	Brake
15	WEA 5 (Windpark Golzwarden)	3050	19.07.2017	03.09.2019	Brake
16	V 16755-03	2000	14.01.2003	15.05.2020	Brake
17	WEA 1 (Windpark Golzwarden)	3050	31.08.2017	03.09.2019	Brake
18	HAM 2 - 301350	3370	28.10.2017	13.05.2020	Brake
19	V 16754-04	2000	20.01.2003	15.05.2020	Brake
20	V 16754-02	2000	12.12.2002	15.05.2020	Brake
21	HAM 1 - 301349	3370	28.09.2017	13.05.2020	Brake
22	WEA 3	2300	14.11.2017	27.06.2019	Butjadingen
23	WP Tossens Anlage 2 (441951)	600	23.02.2004	27.11.2020	Butjadingen
24	WEA 01, 827129	2300	26.09.2017	26.04.2019	Butjadingen

25	WP Stollhamm 783478	2300	29.11.2011	11.01.2021	Butjadingen
26	Butjadingen 3	2300	26.03.2012	07.12.2020	Butjadingen
27	Windkraftanlag e Betrieb	150	08.04.1992	18.06.2020	Butjadingen
28	WP Tossens Anlage 4 (441953)	600	16.02.2004	27.11.2020	Butjadingen
29	WEA R3	2300	02.02.2013	29.11.2020	Butjadingen
30	WP Stollhamm 783477	2300	27.12.2011	08.01.2021	Butjadingen
31	Rothenhahn	150	05.03.1993	05.11.2020	Butjadingen
32	WEA 1 - 824197	2300	03.05.2012	04.08.2020	Butjadingen
33	WP Isens 2729	600	20.06.1997	07.10.2019	Butjadingen
34	WP Stollhamm 783479	2300	26.10.2011	11.01.2021	Butjadingen
35	WEA 5	2300	19.09.2017	27.06.2019	Butjadingen
36	WP Tossens Anlage 1 (441950)	600	26.02.2004	27.11.2020	Butjadingen
37	WEA 2	2300	17.11.2017	27.06.2019	Butjadingen
38	R7	2300	07.11.2011	25.07.2019	Butjadingen
39	Windpark Schütting GmbH & Co. WEA Nr.2 KG	2300	16.10.2017	28.02.2019	Butjadingen
40	WEA 5 - 824201	2300	08.05.2012	04.08.2020	Butjadingen
41	Windpark Schütting GmbH & Co. KG	2300	29.09.2017	28.02.2019	Butjadingen
42	WEA 3 - 824199	2300	24.04.2012	04.08.2020	Butjadingen
43	WP Stollhamm 783481	2300	10.11.2011	11.01.2021	Butjadingen
44	Deich	150	08.03.1994	19.08.2019	Butjadingen
45	WP Isens 2732	600	24.06.1997	07.10.2019	Butjadingen
46	WEA R4	2300	21.01.2013	29.11.2020	Butjadingen
47	Windkraftanlag e Inte (WEA 4)	2300	16.11.2011	13.08.2019	Butjadingen
48	1 KWEA EAZ- 12	12,5	30.11.2018	11.01.2021	Butjadingen
49	alte Dame	55	30.11.1989	31.01.2021	Butjadingen
50	R6	2300	17.10.2011	25.07.2019	Butjadingen
51	WEA 2 - 824198	2300	27.04.2012	04.08.2020	Butjadingen
52	WEA R1	2300	27.12.2012	30.11.2020	Butjadingen
53	WP Isens 2731	600	20.06.1997	07.10.2019	Butjadingen
54	WEA 03, 827131	2300	08.09.2017	26.04.2019	Butjadingen
55	WEA Nr. 1	2300	01.10.2017	22.01.2021	Butjadingen
56	Windpark Isens	4800		06.11.2020	Butjadingen

57	ANBonus-Rothenhahn	150	06.03.1993	09.01.2021	Butjadingen
58	WP Tossens Anlage 3 (441952)	600	17.02.2004	27.11.2020	Butjadingen
59	WP Isens 2730	600	24.06.1997	07.10.2019	Butjadingen
60	1 KWEA EAZ-12	12,5	17.07.2018	15.12.2020	Butjadingen
61	WEA 4	2300	26.09.2017	27.06.2019	Butjadingen
62	WP Isens 2728	600	20.06.1997	07.10.2019	Butjadingen
63	WP Isens 2733	600	20.06.1997	07.10.2019	Butjadingen
64	1 KWEA EAZ-12	12,5	17.07.2018	15.12.2020	Butjadingen
65	WEA 02, 827130	2300	20.09.2017	26.04.2019	Butjadingen
66	WEA 1	2300	29.09.2017	27.06.2019	Butjadingen
67	WEA Nr. 2	2300	01.10.2017	22.01.2021	Butjadingen
68	WEA 4 - 824200	2300	11.05.2012	04.08.2020	Butjadingen
69	V27	225	23.02.1993	15.06.2020	Butjadingen
70	WEA 7 - 824203	2300	13.04.2012	04.08.2020	Butjadingen
71	WEA 6	2300	28.09.2017	27.06.2019	Butjadingen
72	E 783889-01	2300	14.12.2012	09.10.2020	Butjadingen
73	R8	2300	03.11.2011	25.07.2019	Butjadingen
74	Wehrder Bt WEA 3	1800	17.08.2000	19.01.2021	Elsfleth
75	Wehrder 1. Be. WEA 10	1800	30.06.2000	18.01.2021	Elsfleth
76	Windpark Bardenfleth WEA 1	3400	28.02.2018	27.01.2021	Elsfleth
77	Wehrder 1. Be. WEA 1	1800	04.08.2000	18.01.2021	Elsfleth
78	1 Bürgerwindpark WEA 8	1800	16.06.2000	18.01.2021	Elsfleth
79	N-27 ELS-Wehrder	150	06.10.1993	21.01.2021	Elsfleth
80	Wehrder 1. Be. WEA 9	1800	28.07.2000	18.01.2021	Elsfleth
81	Huntorfer Windpark WEA 1	2300	14.07.2006	19.01.2021	Elsfleth
82	Huntorfer Windpark WEA 3	2300	27.06.2006	27.01.2021	Elsfleth
83	Wehrder 1. Be. WEA 2	1800	10.08.2000	18.01.2021	Elsfleth
84	Wehrder Bt WEA 5	1800	30.06.2000	19.01.2021	Elsfleth
85	Huntorfer Windpark WEA 3	2300	27.06.2006	20.01.2021	Elsfleth

86	Huntorfer Windpark WEA 4	2300	20.07.2006	19.01.2021	Elsfleth
87	Huntorfer Windpark WEA 2	2300	10.07.2006	19.01.2021	Elsfleth
88	Huntorfer Windpark WEA 5	2300	05.07.2006	19.01.2021	Elsfleth
89	2 Bürgerwindpark WEA 11	1800	07.06.2000	18.01.2021	Elsfleth
90	Wehrder Bt WEA 4	1800	26.08.2000	19.01.2021	Elsfleth
91	Windpark Bardenfleth WEA 3	3400	14.03.2018	27.01.2021	Elsfleth
92	Wehrder Bt WEA 6	1800	14.07.2000	19.01.2021	Elsfleth
93	Wehrder Bt WEA 7	1800	20.07.2000	19.01.2021	Elsfleth
94	Wehrder 1. Be. WEA 13	1800	29.06.2000	18.01.2021	Elsfleth
95	Windpark Bardenfleth WEA 2	3400	21.03.2018	27.01.2021	Elsfleth
96	Windpark Bardenfleth 4. KG, WEA 4	3400	27.03.2018	15.04.2019	Elsfleth
97	3 Bürgerwindpark WEA 12	1800	22.06.2000	18.01.2021	Elsfleth
98	WEA 2	2000	31.12.2005	04.09.2019	Jade
99	WEA 1	2000	18.01.2006	04.09.2019	Jade
100	1 KWEA EAZ- 12	12,5	14.12.2018	11.01.2021	Jade
101	WEA 1	3000	25.02.2017	29.07.2019	Jade
102	WP Jadeaußendeic h Anlage 2 (702807)	2000	30.12.2007	08.12.2020	Jade
103	WEA 03	3000	25.03.2017	06.01.2021	Jade
104	WP Jadeaußendeic h Anlage 1 (702806)	2000	14.02.2008	08.12.2020	Jade
105	WEA 06	3000	18.03.2017	12.01.2021	Jade
106	WP Jadeaußendeic h Anlage 3 (702808)	2000	08.02.2008	08.12.2020	Jade
107	WEA 4	3000	23.02.2017	29.07.2019	Jade
108	WEA 7	3000	22.02.2017	29.07.2019	Jade
109	WEA 5	3000	09.03.2017	29.07.2019	Jade
110	WEA 08	3000	30.03.2017	06.01.2021	Jade

111	WKA Achtermeer 14837	1650	21.12.2001	20.06.2019	Jade
112	WEA 2	3000	25.02.2017	29.07.2019	Jade
113	BfZ WEA E+B 1 (33)	3200	28.12.2016	26.01.2021	Lemwerder
114	Gand 02- 300681_22	3170	30.12.2014	26.02.2020	Lemwerder
115	Gand 01- 300682_21	3170	22.12.2014	26.02.2020	Lemwerder
116	Ochtumwind WEA	3050	28.11.2014	18.11.2019	Lemwerder
117	Windpark Sannauerfeld	3200	16.02.2017	25.01.2021	Lemwerder
118	BfZ WEA Windfarm 1 (23)	3200	06.12.2014	26.01.2021	Lemwerder
119	Burggroden WEA4	800	29.06.2010	05.02.2019	Nordenham
120	Burggroden WEA3	800	12.12.2005	05.02.2019	Nordenham
121	Nordenham_W EA_6	1500	30.07.2002	17.12.2020	Nordenham
122	2. WPS	1500	09.07.2002	11.01.2021	Nordenham
123	Burggroden WEA1	800	12.12.2005	05.02.2019	Nordenham
124	Nordenham_W EA_1	1500	24.06.2002	14.11.2019	Nordenham
125	Nordenham_W EA_2	1500	25.06.2002	14.11.2019	Nordenham
126	OBS Luisenhof -3	80	31.05.1991	01.02.2021	Nordenham
127	Nordenham_W EA_3	1500	24.06.2002	14.11.2019	Nordenham
128	Nordenham_W EA_4	1500	24.06.2002	14.11.2019	Nordenham
129	Burggroden WEA7	2300	28.05.2018	05.02.2019	Nordenham
130	WP Oldenbroker Feld I 14830	1650	20.12.2001	21.10.2019	Ovelgönne
131	WEA 05	4200	26.03.2018	09.04.2019	Ovelgönne
132	WEA 04	4200	29.03.2018	09.04.2019	Ovelgönne
133	WEA 09	4200	08.02.2018	10.04.2019	Ovelgönne
134	Linebroker Wind GmbH & Co.KG 218972	3450	24.11.2017	15.08.2019	Ovelgönne
135	WEA 1 782646	2300	02.10.2009	21.11.2020	Ovelgönne
136	WEA 11	4200	22.06.2018	10.04.2019	Ovelgönne
137	WEA 10	4200	27.02.2018	10.04.2019	Ovelgönne
138	Linebroker Wind GmbH & Co.KG 218973	3450	16.11.2017	15.08.2019	Ovelgönne

139	WP Oldenbroker Feld I 11948	2000	20.12.2001	15.10.2019	Ovelgönne
140	OF III 218966	3300	13.12.2017	27.02.2019	Ovelgönne
141	OF III 213243	3300	29.01.2018	27.02.2019	Ovelgönne
142	WEA 03	4200	23.03.2018	03.04.2019	Ovelgönne
143	WEA 07	4200	22.06.2018	10.04.2019	Ovelgönne
144	OF II 213244	3300	09.12.2016	27.02.2019	Ovelgönne
145	WEA 06	4200	07.03.2018	10.04.2019	Ovelgönne
146	WP Oldenbroker Feld I 14829	1650	20.12.2001	21.10.2019	Ovelgönne
147	WEA 01	4200	29.05.2018	03.04.2019	Ovelgönne
148	OF II 213245	3300	09.12.2016	27.02.2019	Ovelgönne
149	OF III 218965	3300	08.12.2017	27.02.2019	Ovelgönne
150	WP Oldenbroker Feld I 11951	2000	20.12.2001	16.10.2019	Ovelgönne
151	WP Oldenbroker Feld I 18801	2000	14.12.2004	21.10.2019	Ovelgönne
152	OF III 218971	3300	20.11.2017	26.02.2019	Ovelgönne
153	WP Oldenbroker Feld I 11950	2000	20.12.2001	15.10.2019	Ovelgönne
154	OF II 213242	3300	09.12.2016	27.02.2019	Ovelgönne
155	WP Oldenbroker Feld I 14826	1650	20.12.2001	16.10.2019	Ovelgönne
156	WP Oldenbroker Feld I 11949	2000	20.12.2001	15.10.2019	Ovelgönne
157	WEA 12	4200	15.02.2018	10.04.2019	Ovelgönne
158	OF III 218964	3300	24.11.2017	27.02.2019	Ovelgönne
159	WP Oldenbroker Feld I 14828	1650	20.12.2001	21.10.2019	Ovelgönne
160	WEA 02	4200	27.03.2018	03.04.2019	Ovelgönne
161	OF III 218969	3300	29.12.2017	26.02.2019	Ovelgönne
162	WEA 08	4200	14.12.2017	10.04.2019	Ovelgönne
163	OF III 218970	3300	20.12.2017	26.02.2019	Ovelgönne
164	WEA 1 70240	1800	15.02.2001	21.11.2020	Stadland
165	WEA 2 70241	1800	16.02.2001	21.11.2020	Stadland
166	KA_Stadland_ Wind_01	200	25.01.1991	02.10.2020	Stadland
167	Windkraft 9427	500	10.04.1996	27.01.2020	Stadland
168	Am Deich mit schöner Aussicht	500	12.02.1995	09.12.2020	Stadland
169	WEA 02	2300	27.09.2018	27.07.2020	Stadland
170	WEA 4 70243	1800	07.02.2001	21.11.2020	Stadland
171	Windpark Wesermarsch WEA 3	2300	22.01.2016	16.11.2020	Stadland

172	Windkraft	10	14.01.2019	12.09.2019	Stadland
173	WEA 5 70244	1800	31.01.2001	21.11.2020	Stadland
174	WEA 01	2300	14.09.2018	27.07.2020	Stadland
175	WIP Stadland KG	2300	20.12.2016	02.09.2019	Stadland
176	Windpark Wesermarsch WEA 2	2300	23.12.2015	13.11.2020	Stadland
177	WEA03	2300	21.09.2018	27.07.2020	Stadland
178	WEA 3 70242	1800	09.02.2001	21.11.2020	Stadland
179	Windpark Wesermarsch WEA 1	2300	30.12.2015	12.11.2020	Stadland
180	Windkraft 9403	500	12.05.1995	06.02.2019	Stadland
181	WEA 01	2300	26.09.2018	26.01.2021	Stadland
182	WEA 781223 Lockfleth	2300	12.12.2006	21.11.2020	Stadland
183	WIP Jadebusen KG	2300	14.12.2016	02.09.2019	Stadland