

Ermittlung europaweiter Kraftstoffbedarfe für den Flugverkehr
sowie für die Containerschiffahrt mit einem
Wirtschaftlichkeitsvergleich CO₂-neutraler Schiffsantriebe

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science“ (M.Sc.)

im Studiengang

Regenerative Energien und Energieeffizienz

an der Universität Kassel

vorgelegt von

Christoph Zink

7. Mai 2021

Gutachter:

Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann

Prof. Dr.-Ing. Kurt Rohrig

Betreuer:

M.Sc. Maximilian Pfennig

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Masterarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt wurde. Alle verwendeten Passagen wurden kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Kassel, den 7.Mai 2021

Christoph Zink

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an all diejenigen aussprechen, die mich bei der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und mich während meines Studiums begleitet haben.

Zuerst gebührt mein Dank meinem Betreuer Maximilian Pfennig, der mir während meiner Zeit am Fraunhofer IEE viel beigebracht und maßgeblich bei der Erarbeitung dieser Arbeit mitgewirkt hat. Ebenfalls möchte ich mich bei Jonas Eschmann für die gemeinsame Entwicklung neuer Ideen sowie dem kreativen fachlichen Austausch bedanken.

Dankend zu erwähnen ist, dass mir durch die Unterstützung von Herr Prof. Dr. Clemens Hoffmann in den letzten Jahren ermöglicht wurde, neue systemtheoretische Denkansätze zu verfolgen und diese Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE und der Universität Kassel zu verfassen.

Für den fachlichen Austausch sowie zahlreiche Hilfestellungen bei meinen Berechnungen geht ein großer Dank an Benedikt Häckner. Außerdem möchte ich mich bei meinem Korrekturleser und besten Freund Heiko Spielberg für seine Unterstützung bedanken.

Ebenfalls schulde ich Tabea Hildebrand einen großen Dank, weil Sie mir während der Zeit meiner Masterarbeit geholfen hat meinen persönlichen Fokus nicht aus dem Auge zu verlieren.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Monika und Manfred Zink für ihr bedingungsloses Vertrauen und die Unterstützung während meines kompletten Studiums bedanken.

Kurzfassung

Um einer Klimakatastrophe entgegenzuwirken wurde die Senkung des Ausstoßes von Treibhausgasen von den Vereinten Nationen als Ziel beschlossen. Der Flugverkehr hat einen Anteil von 2,4 % und der maritime Transportsektor einen Anteil von 2,9 % an den globalen Treibhausgasemissionen. Da diese Sektoren feste Bestandteile des modernen Lebens und des wirtschaftlichen Wachstums sind, muss ein Umstieg auf alternative CO₂-neutrale Antriebskonzepte erfolgen.

Um den wirtschaftlichen Einfluss bei einer Umstellung auf klimaneutrale Power Fuels im Luft- und Seeverkehr einzuschätzen, werden die Produktionskosten an 18 unterschiedlichen Standorten mit guten Wind- und Strahlungsbedingungen für das Jahr 2030 analysiert. Für die Bereitstellung des für die Kraftstoffsynthese benötigten Kohlenstoffdioxides, wird die Leistungsfähigkeit der Direct-Air-Capture Technologie anhand von Angaben aus der Literatur und standortabhängige Umweltbedingungen modelliert. Um das Ausmaß einer industriellen regenerativen Kraftstoffproduktion für systemanalytische Betrachtungen sowie eine planungsstrategische Ausrichtung innerhalb der Europäischen Union zu erhalten, werden in dieser Arbeit die europäischen Kraftstoffbedarfe für den Flugverkehr und die Containerschiffahrt bestimmt.

Auf Basis von öffentlich zugänglichen Daten wird der Kraftstoffbedarf für 332 europäische Flughäfen berechnet. Die Rechenmethodik wurde durch bereitgestellte Verbrauchswerte einzelner Flughafenbetreiber und durch länderspezifische CO₂-Emissionen überprüft. Es konnte ein jährlicher Bedarf von 52,7 Mio. t für den Passagierflugverkehr und 8,16 Mio. t für den Frachtflugverkehr identifiziert werden. Eine Zuordnung der Verbräuche auf Flugentfernungsintervallen sowie eine monatliche Auflösung konnte aus den erzeugten Daten abgeleitet werden. Für den maritimen Sektor werden die Energiebedarfe für 384 Containerschiffe, mit einer Ladekapazität über 10.000 TEU, auf einem globalen Verkehrsnetz zugeordnet. Die Analyse umfasst 23,2 % der globalen Containerkapazität.

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden referenzierte Transportkosten unter Verwendung von Power Fuels errechnet. Es wird ein Wirtschaftsvergleich zwischen einer Kraftstoffproduktion auf Basis des DAC-Verfahrens und der am Fraunhofer IEE entwickelten P2CE-Technologie vorgenommen. Diese sieht eine CO₂-Abscheidung unter der Nutzung systeminterner Synergieeffekte an Bord des Schiffes mit anschließender Wiederverwendung in der Synthese vor. Da durch die Speicherung des CO₂ an Bord und einem Zeitverlust durch eine Betankung an Synthesestätten Opportunitätskosten entstehen, wurden die Kraftstofftanks sowie Betankungsabfolgen anhand der identifizierten Routeninformationen optimiert.

Abstract

The reduction of greenhouse gas emissions is a target defined by the United Nations to counteract a climate catastrophe. Aviation accounts for 2.4%, the maritime transport sector for 2.9% of global greenhouse gas emissions. As these sectors are integral parts of modern life and economic growth, alternative CO₂-neutral propulsion concepts should be used perspectively.

The production costs of carbon neutral power fuels for aviation and maritime transport are analyzed for 18 different locations with favorable wind and radiation conditions for the year 2030. To provide the carbon dioxide needed for fuel synthesis, the performance of direct-air-capture technology is modeled using information from the literature and site-dependent environmental conditions. The European fuel demand for aviation and container shipping is determined in this thesis to lay the foundation for a strategy change regarding carbon-neutral propulsion within the European Union.

Based on publicly available data, the fuel demand for 332 European airports is calculated. The methodology is verified using consumption values provided by airport operators as well as country specific emissions of CO₂. An annual fuel consumption of 52.7 million tons for passenger air traffic and 8.16 million tons for cargo air traffic is identified. An allocation of the demand to flight distance intervals and additionally a monthly resolution is derived from the generated data. The energy demand for 384 container ships with a loading capacity above 10,000 twenty-foot-units is mapped on a global transport network. The analysis covers 23.2% of the global container capacity. In a profitability analysis, referenced transport costs are calculated using power fuels.

An economic comparison is made between fuel production based on the DAC process and the P2CE technology developed at the Fraunhofer IEE in 2018. The P2CE concept provides a CO₂ capture technology aboard the ship using synergy effects within the system and subsequent reuse in fuel synthesis. The storage of CO₂ on board and a time loss due to refueling at fuel synthesis sites result in opportunity costs, which are considered in the analysis. Fuel tank sizes and refueling sequences is optimized based on the identified route information.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Motivation und Ziel.....	2
1.3 Struktur der Masterarbeit.....	4
2 Theoretischer Hintergrund.....	5
2.1 Regenerative Kraftstoffe.....	6
2.1.1 Elektrolyse.....	7
2.1.2 Kohlenstoffquellen.....	9
2.1.3 Kraftstoffsynthese.....	14
2.2 Flugverkehr.....	16
2.2.1 Passagieraufkommen & Luftfrachtraten.....	17
2.2.2 Treibhausgasemissionen.....	18
2.3 Maritimer Frachtverkehr.....	20
2.3.1 Welthandelsflotte.....	20
2.3.2 Containerschiffahrt.....	21
2.3.3 Emissionsregularien in der Containerschiffahrt.....	23
2.3.4 Emissionsminderungsstrategien der Containerschiffahrt.....	24
2.3.5 Das Power-to-Cycle-Engine-Konzept.....	27
3 Methodik.....	30
3.1 Kosten der regenerativen Kraftstoffproduktion.....	30
3.1.1 Datengrundlage und verwendete Bestandsmodelle.....	30
3.1.2 Kostenparameter.....	32
3.1.3 CO ₂ -Bereitstellung mittels Direct-Air-Capture.....	34
3.2 Bedarfsanalyse des Luftverkehrs.....	39
3.2.1 Datengrundlage.....	40
3.2.2 Kraftstoffbedarf von Flugzeugen.....	40
3.2.3 Auslastungsraten im Luftverkehr.....	41
3.3 Bedarfs- und Transportkostenanalyse des Containerschiffsverkehrs.....	42
3.3.1 Routenidentifikation.....	44
3.3.2 Kraftstoffbedarf von Containerschiffen.....	45
3.3.3 Wirtschaftlichkeit Containerschiffahrt.....	47
3.3.4 P2CE-Antriebstechnologie in der Containerschiffahrt.....	48

4	Ergebnisse	54
4.1	Kraftstoffproduktion	54
4.1.1	Kostenverteilung	55
4.1.2	Analyse der CO ₂ -Bereitstellung durch Direct-Air-Capturing.....	55
4.2	Kraftstoffbedarfe des europäischen Flugverkehrs.....	57
4.2.1	Flughäfen in Deutschland	57
4.2.2	Flughäfen in Europa	58
4.2.3	Kraftstoffbedarfe der Entfernungsintervalle.....	60
4.3	Kraftstoffbedarfe und Transportkosten in der Containerschiffahrt	62
4.3.1	Geographische Zuordnung der Kraftstoffbedarfe	62
4.3.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	63
4.3.3	Verteilung der Kraftstoffproduktion	65
5	Diskussion.....	67
5.1	Kraftstoffproduktion	67
5.2	Kraftstoffbedarfe des europäischen Flugverkehrs.....	69
5.3	Kraftstoffbedarfe und Transportkosten in der Containerschiffahrt	70
6	Fazit und Ausblick	74
7	Literatur.....	77
Anhang	i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Energiebedarfsszenarien des Transportsektors.....	5
Abbildung 2 – Regionale Streckenanteile des Passagier- und Frachtflugverkehrs.....	17
Abbildung 3 – Prognosen für den Passagierluftverkehr	18
Abbildung 4 – Emissionen und Effizienzeffekte des von Europa ausgehenden Flugverkehrs	19
Abbildung 5 – Zeitliche Entwicklung der transportierten Frachtmenge	20
Abbildung 6 – Eigenschaften der Transportklassen	21
Abbildung 7 – Globale TEU-Kapazitäten der Konsortien	22
Abbildung 8 – Energiedichten diskutierter Treibstoffe.....	25
Abbildung 9 – P2CE-Konzept.....	28
Abbildung 10 – Konzept Refuel-Island.....	29
Abbildung 11 – Vorrangflächen für die Produktion von regenerativen Kraftstoff.....	31
Abbildung 12 – Gleichgewichtskapazität des Adsorptionsmittels der Firma <i>Hydrocell Ltd.</i>	35
Abbildung 13 – Beladungskapazität des Adsorbermaterials.....	36
Abbildung 14 – Verlauf der Temperatur, der rel. Luftfeuchtigkeit und der Abscheiderate des Adsorptionsmittels	38
Abbildung 15 – Treibstoffbedarf von Flugzeugen in Abhängigkeit von der Strecke..	41
Abbildung 16 – Ladekapazität und Baujahr der betrachteten Containerschiffe	43
Abbildung 17 – Routen zwischen den identifizierten Häfen	45
Abbildung 18 – 3D-Matrix zum Treibstoffverbrauch von Containerschiffen	46
Abbildung 19 – P2CE-Betankungspunkte	50
Abbildung 20 – Errechnete Kraftstoffgestehungskosten für DAC-Szenarios	54
Abbildung 21 – Kostenkomponenten der Produktionskosten des DAC- Szenarios...	55
Abbildung 22 – Einfluss von regionalen Umweltbedingungen auf die Treibstoffproduktionskosten in den DAC-Szenarien	56
Abbildung 23 – Kraftstoffgestehungskosten der betrachteten Länder.....	57
Abbildung 24 – Kraftstoffbedarf von sieben deutschen Flughäfen	58
Abbildung 25 – Kraftstoffbedarf ausgewählter europäischer Länder und europäischer Gesamtbedarf.....	59

Abbildung 26 – Errechnete Jahreskraftstoffbedarfe europäischer Flughäfen und Einzelstaaten.....	60
Abbildung 27 – Aufteilung der Treibstoffbedarfe des Passagierflugverkehrs nach Entfernungsintervallen	61
Abbildung 28 – Aufteilung der Treibstoffbedarfe des Frachtluftverkehrs nach Entfernungsintervallen	61
Abbildung 29 – Kumulierter Energiebedarf von identifizierten Containerschiffen auf Routen	62
Abbildung 30 – Durchschnittliche Kostenverteilung in der Containerschiffahrt.....	63
Abbildung 31 – Transportkosten unterschiedlicher Szenarien.....	64
Abbildung 32 – Sensitivitätsanalyse der Transportkosten unter Variation der DAC-Investitionskosten	65
Abbildung 33 – Zugeordnete Kraftstoffproduktionsmengen des P2CE-Szenarios.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Eigenschaften von unterschiedlichen Arten der Elektrolyse	9
Tabelle 2 – Bewertungskriterien verschiedener regenerativer Kraftstoffe	26
Tabelle 3 – Angenommenen Kosten der Stromerzeuger	32
Tabelle 4 – Kostenannahmen der Elektrolyse- und Syntheseanlage	33
Tabelle 5 – Kostenannahmen der Direct-Air-Capture-Anlagen	33
Tabelle 6 – Kostenannahmen der Flexibilisierungsoptionen	33
Tabelle 7 – Kostenannahmen der Wärmeerzeuger	34
Tabelle 8 – Annahmen zu Flugklassen	42

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
AIS	Nautisches Funksystem (automatic identification system)
CAPEX	Investitionsausgaben (capital expenditures)
CO ₂ -eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DAC	Abscheideverfahren von CO ₂ aus der Umgebungsluft (direct-air-capture)
EU-ETS	EU-Emissionshandel (European Union Emissions Trading System)
IMO	Internationale Maritime Organisation
LCOE	Stromgestehungskosten (levelized cost of electricity)
LNG	Verflüssigtes Erdgas (liquefied natural gas)
LoC _s	Verminderte Transportleistung infolge von Platzmangel (loss-of-cargo _{space})
LoC _t	Verminderte Transportleistung infolge von Zeitverlust (loss-of-cargo _{time})
LOHC	Organischer Wasserstoffträger (liquid organic hydrogen carrier)
MDO	Marinediesel (marine diesel oil)
MENA	Region von Marokko bis zum Iran (middle east & north africa)
Mio	Millionen
Mrd	Milliarden
NECA	Gebiete mit Stickstoffgrenzwert (nitrous oxide emission control area)
OPEX	Betriebsausgaben (operational expenditures)
PEMEL	Polymer-Membran Elektrolyseur
PPM	Parts per million
PtF	Power-to-Fuel
PtX	Power-to-X
RPK	Passagierkilometer (revenue passenger kilometers)
RWGS	Umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion (reverse watergas-shift-reaction)
SECA	Gebiete mit Schwefelgrenzwert (sulphur oxide emission control area)
SOEL	Festoxidelektrolyseur (Solid Oxide Electrolysis)
TEU	20-Fuß Standardcontainer (twenty-foot equivalent unit)
TRL	Technologie-Reifegrad (technology readiness level)
WACC	Kapitalkostensatz (weighted average cost of capital)
WRG	Wärmerückgewinnung

1 Einleitung

Am 12. Dezember 2015 wurde auf der internationalen Klimakonferenz in Paris eine rechtsverbindliche Vereinbarung von 189 Ländern beschlossen, um den Auswirkungen des globalen Klimawandels entgegenzuwirken. Im Mittelpunkt der nationalen Strategien in Europa stehen die Emissionen des Energie-, Wärme- und inländischen Verkehrssektors [1]. Anhand jährlich erstellter Verbrauchsdaten lassen sich die Bemühungen der Einzelstaaten messen und die Einhaltung der selbst gesetzten Ziele überprüfen. In allen Sektoren dominiert die Nutzung von fossilen Energieträgern. Dem Transportsektor können weltweit etwa die Hälfte des gesamten Ölverbrauchs zugeordnet werden [2, 3]. Zudem wächst die Transportleistung von Gütern seit 1990 durch den internationalen Schiffsverkehr um mehr als ein Drittel und der internationale Personenluftverkehr hat sich im gleichen Zeitraum mehr als verdoppelt. Dem Flugverkehr können 2,4 % und dem Seeverkehr 2,9 % des globalen Ausstoßes an Treibhausgasen zugeordnet werden [4, 5].

1.1 Problemstellung

Im Flug- und Seeverkehr stellt eine CO₂-neutrale Energiebereitstellung sowie eine Energiewandlung innerhalb des Transportsystems, aufgrund der zu überwindenden Reichweiten, eine hohe technische Hürde dar. Um die Transformation zu einem klimafreundlichen See- und Flugverkehr zu ermöglichen, stehen verschiedene Realisierungspfade zur Verfügung.

Zurzeit wird eine breite Diskussion in Politik und Forschung geführt, wie der Energiebedarf des Verkehrssektors durch synthetisch hergestellte Power-to-X (PTX)-Kraftstoffe unter der Verwendung von regenerativen Energiequellen gedeckt werden kann. Dieser Ansatz wird verfolgt, da im Gegensatz zum Straßenverkehr keine vollständige Elektrifizierung aufgrund von hohen Energiespeicherbedarfen erreicht werden kann [6, 7]. Als sogenannte klimaneutrale Power Fuels stehen für die Dekarbonisierung des internationalen Güter- und Personenverkehrs neben Wasserstoff auch Ammoniak sowie regenerativ erzeugte Kohlenwasserstoffe als Alternativen zur Verfügung. Die Energiewandlungspfade weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf, welche auf den energetischen und technischen Aufwand während der Produktion zurückzuführen sind. Außerdem sind die physische Beschaffenheit und die Art der Verwendung der Kraftstoffe zu berücksichtigen. Ein auszuwählender, umsetzbarer Weg muss neben der technischen Machbarkeit auch eine wirtschaftliche Vertretbarkeit aufweisen. Insbesondere den Kohlenwasserstoffen wird aufgrund ihrer Ähnlichkeit zu konventionellen Treibstoffen wie Diesel, Kerosin oder Methan eine Drop-In-Fähigkeit und somit eine hohe

Anwendbarkeit zugesprochen. Jedoch sind für den Einsatz von Power Fuels ebenfalls technische Hürden zu bewältigen. Für die Produktion von synthetischen Kohlenwasserstoffen wird CO₂ benötigt. Ein wirtschaftliches Verfahren zur Bereitstellung benötigter CO₂-Mengen ist elementar für dieses Vorgehen. Die derzeit diskutierten Lösungsansätze aus der Wissenschaft sehen vor, die Bedarfe an CO₂ aus Punktquellen sowie durch Filterung der Umgebungsluft zu decken. Als Punktquellen dienen in diesem Szenario konventionelle Kraftwerke sowie CO₂-intensive Industrieprozesse. Die Abgase werden technisch aufbereitet und stehen anschließend der Produktion von synthetischen Kohlenwasserstoffen zur Verfügung. Aufgrund der Dekarbonisierung entfällt in Zukunft die Energiewirtschaft als beständige CO₂-Quelle. Des Weiteren sind die Quellpotentiale von z.B. der Zement- und Stahlproduktion durch den Einsatz von Wasserstoff begrenzt und können lediglich als Übergangs- oder Nebenquellen angesehen werden. Daher ist vorgesehen den kontinuierlichen Ausbau von Direct-Air-Capture (DAC)-Anlagen, welche CO₂ aus der Umgebungsluft filtern, voranzubringen. Folglich soll die DAC-Technologie einen Großteil der benötigten Mengen an Kohlenstoffdioxid für die globale PtX-Wirtschaft im Jahr 2050 zur Verfügung stellen. [8]

Als eine weitere Option für die CO₂-Bedarfsdeckung für die Kraftstoffherstellung innerhalb der Seeschifffahrt wurde am Fraunhofer IEE im Jahr 2018 das Power-to-Cycle Engine Konzept (P2CE) entwickelt. Hierbei wird das während der Verbrennung anfallende Kohlenstoffdioxid abgespeichert und für die Kraftstoffproduktion wiederverwendet. Der Kern des Konzeptes wird durch die Ausnutzung systeminterner Synergieeffekte beschrieben, um eine energieeffiziente Abtrennung sowie Einlagerung des entstandenen Kohlenstoffdioxids durch die Verbrennungskraftmaschine direkt auf dem Schiff zu verwirklichen. Eine CO₂-Kreislaufwirtschaft kann in der Seeschifffahrt durch dieses Vorgehen ermöglicht werden.

1.2 Motivation und Ziel

Da im Zuge der Maßnahmen zur Begegnung des Klimawandels im See- und Flugverkehr noch keine CO₂-neutrale Technologie im großen Maßstab verwendet wird, müssen technische Entwicklungen verfolgt und Optionen abgewogen werden. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Dekarbonisierung in diesen Sektoren sind Systemanalysen ein wichtiges Werkzeug, um Handlungsempfehlungen für Wirtschaft und Politik abzuleiten. Wird der Wandel zu einer klimaneutraleren Energiebereitstellung durchgeführt, entsteht ein neuer Wirtschaftszweig welcher ebenfalls auf Empfehlungen der Wissenschaft angewiesen ist.

Für die Schaffung einer neuen Wertschöpfungskette werden sowohl etablierte Verfahren im industriellen Großmaßstab als auch wirtschaftlich fundierte Konzeptionierungen benötigt. Technologien im Entwicklungsstadium unterliegen üblicherweise in Bezug auf zu erwartende

Effizienzsteigerungen sowie Verbesserungen für eine markttaugliche Handhabung einer gewissen Unsicherheit. Derzeit verfasste Studien schreiben diese nur schwer absehbaren wirtschaftlichen Annahmen auf Basis weniger Datenpunkte bis in das Jahr 2050 fort. Durch Lernraten sowie angenommene Zubauraten werden beispielweise Investitionskosten für kommende Dekaden simuliert. Ausgangsbasis der aktuellen Kosten von Komponenten entlang der Wertschöpfungskette sowie der Anlagen der Kraftstoffverwendung werden teilweise aus Pilotanlagen abgeleitet. Die Betriebsweisen der Testanlagen können jedoch von dem im industriellen Maßstab anzuwendenden Realbedingungen abweichen. Zudem werden Lebenserwartungen von Anlagen abgeschätzt. Die Ergebnisse einer Bewertung unterliegen einer großen Streuung, die auf einen Mangel an belastbaren Informationen zurückzuführen ist. Die Analyse-Ergebnisse sind von großer Bedeutung, da sie wegweisend bei der Bewertung einer Technologie sind. Hieraus entscheidet sich, für welche Technologien weiterführend monetäre Mittel bereitgestellt werden. In diesem Kontext besteht die Aufgabe der Wissenschaft folglich in der Verifizierung von bereitgestellten Daten bezüglich der Wirtschaftlichkeit für den Anlagenbetrieb junger Technologien. Zudem muss die Abschätzung zukünftiger Treibstoffbedarfe für den Übersee- und Flugverkehr auf realistischen Annahmen basieren und bekannt sein, aufgrund welcher Einflüsse diese entstehen. Branchenintern vorausgesagte Wachstumsraten müssen kritisch durch wissenschaftliche Methoden betrachtet werden, um diese sinnlich in dem Diskurs zu bewerten. Aus der Gesamtheit dieser Aspekte, lässt sich ableiten, dass trotz einer systemweiten Betrachtung, jeder Teilbereich mit einem möglichst hohen Detaillierungsgrad betrachtet werden sollte.

In einem ersten Schritt soll eine Methodik zur Ermittlung der aktuellen Treibstoffbedarfe im See- und Flugverkehr erstellt werden. Diese sollen als Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Prognose zukünftiger Treibstoffbedarfe dienen. Es werden Berechnungen der Gesteungskosten für verschiedene Bereitstellungspfade von Power Fuels für das Jahr 2030 erstellt. In diesem Kontext werden Herstellerangaben sowie deren Weiterverwendung in Studien, welche Szenarien für das Jahr 2030 bis 2050 abbilden, zur Leistungsfähigkeit von CO₂-Abscheideeinrichtungen aus der Umgebungsluft untersucht. Auf Basis dieser Treibstoffkosten wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung von Containerschiffen durchgeführt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den Einsatz von Kraftstoffen aus DAC-basierter Betriebsführung mit der P2CE-Technologie wirtschaftlich zu vergleichen. Hierdurch können Chancen und Herausforderungen für die einzelnen Transformationspfade besser bewertet werden.

1.3 Struktur der Masterarbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel auf. Nach der Einleitung beschreibt das Kapitel 2 den theoretischen Hintergrund der regenerativen Kraftstoffe für den Flugverkehr und Seefrachtverkehr. Es wird außerdem das am Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik entwickelte P2CE-Konzept vorgestellt. Das Folgekapitel führt in die Methodik dieser Arbeit ein, indem die Modellierungsansätze erläutert werden. Die Modellierung umfasst die Kostenberechnung der Kraftstoffbereitstellung, die Bedarfsberechnung des Flugverkehrs sowie die Bedarfs- und Wirtschaftlichkeitsberechnung des Containerschiffsverkehrs. Zudem wird auf Basis des P2CE-Konzepts eine kostenbasierte Optimierung der Betriebsführung unter Berücksichtigung der angebotenen und nachgefragten Energiemengen durchgeführt. Das Kapitel 4 zeigt die Ergebnisse der Modellierung in Bezug auf die Treibstoffkosten, die Treibstoffbedarfe europäischer Flughäfen und die Bedarfe der Containerschiffahrt. Diese Ergebnisse werden in dem Kapitel Diskussionen tiefergehend analysiert und bewertet. Das Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Analysen zusammen und endet mit einem Fazit und einem Ausblick.

2 Theoretischer Hintergrund

Durch die Dekarbonisierung im internationalen Transportsektor wird der Bedarf an klimafreundlichen Kraftstoffen steigen [8]. Der Bedarf hängt von der veränderlichen und global im Zusammenhang stehenden Nachfrage nach Personen- und Güterverkehr ab.

Eine hohe Energiedichte der aktuell verwendeten Kraftstoffe ermöglicht den Transport über große Distanzen im internationalen Güter- und Personenverkehr. Eine direkte Elektrifizierung und somit eine Möglichkeit zur klimafreundlicheren Gestaltung, wie sie bspw. im Straßenverkehr möglich ist, wird auf absehbare Zeit aufgrund zu geringen Energiedichten der Batterien, nicht realisierbar sein [9]. Deshalb wird in einschlägigen Studien davon ausgegangen, dass weiterhin flüssige oder gasförmige Kraftstoffe für die Deckung der Transportleistung Verwendung finden. [8]

In Abbildung 1 werden die weltweiten Energiebedarfe des Transportsektors für die folgenden Dekaden von unterschiedlichen wissenschaftlichen Quellen dargelegt. Die aufgeführten Ergebnisse stammen aus globalen systemanalytischen Energiestudien. [2, 8, 10–24]

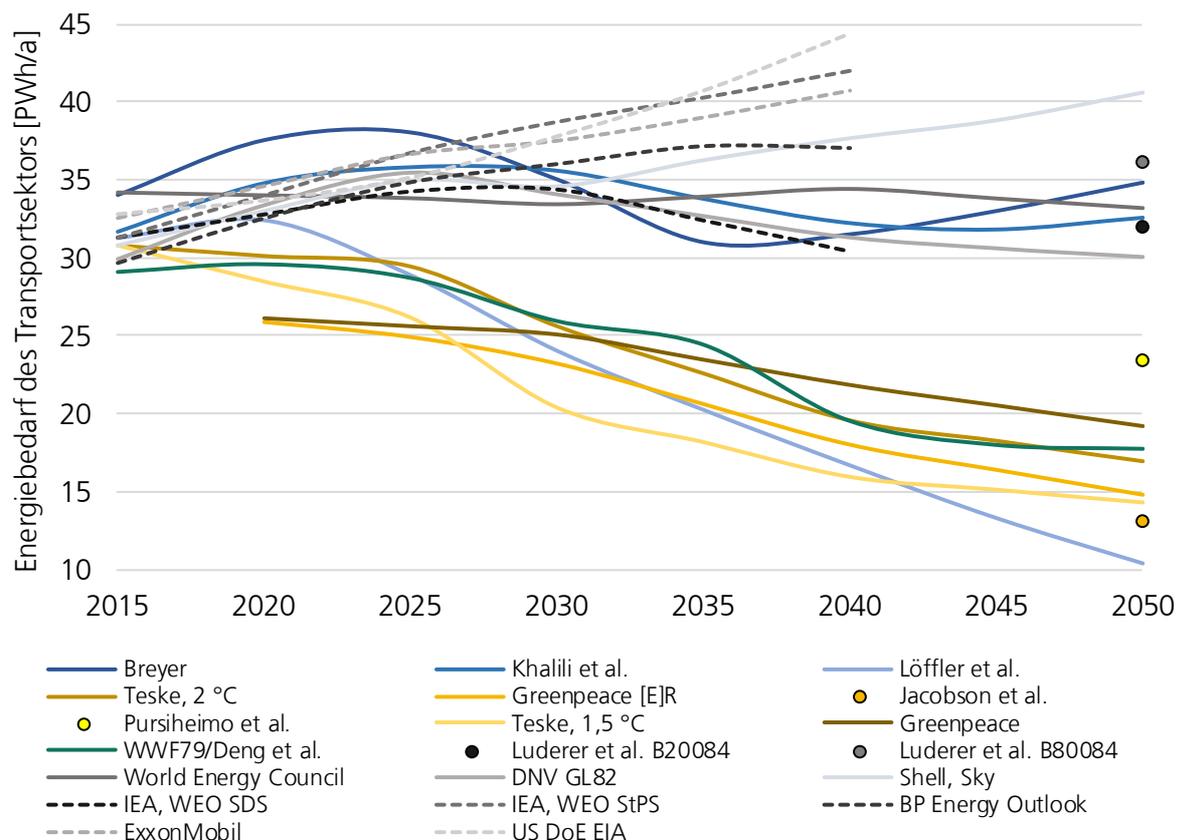


Abbildung 1 – Übersicht verschiedener Energiebedarfsszenarien des Transportsektors, Darstellung auf Basis von [2, 8, 10–24]

Die Deckung in den einzelnen Analysen erfolgt individuell basierend auf einem Zusammenspiel aus fossilen und biogenen Kraftstoffen, regenerativen Power Fuels auf Basis von Kohlenwasserstoffen, Wasserstoff und durch elektrochemische Energiebereitstellung. Die unterschiedlichen Farben der Graphen und Einzelpunkte kennzeichnen die Annahme der Teilbereiche, welche den größten Anteil am Gesamtbedarf decken. Grau steht für Szenarien, die größtenteils den Bedarf durch fossile Kraftstoffe decken. Bei den in Gelb abgebildeten Szenarien wird der größte Anteil des Bedarfs durch strombasierte Antriebe abgedeckt. Dies kann entweder durch Batterien oder durch stationäre Versorgungseinrichtungen wie beispielsweise den Oberleitungen von Zugtrassen gedeckt werden. Blaue Graphen zeichnen die Deckung durch einen hohen Anteil an Power Fuels sowie Wasserstoff aus. Das Szenario, welches durch die grüne Linie dargestellt wird, basiert im Wesentlichen auf biogenen Kraftstoffen, den sogenannten Biofuels. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Studien eine hohe Bandbreite aufweisen.

Die Studien von fossil geprägten Branchenteilnehmern wie *ExxonMobil* und *BP Energy Outlook*, dargestellt als grau gestrichelte Linie, sehen eine zukünftige Bedarfsminderung im Verkehrssektor als nicht realistisch an. Hier ist hervorzuheben, dass in den angesprochenen Studien keine Power Fuels berücksichtigt werden. Für die Energiebedarfs-Szenarien mit einem hohen Elektrifizierungsgrad wird eine Bedarfsminderung angenommen. Zum einen kann die Verringerung auf die ausbleibenden Wandlungsverluste in andere Energieformen, wie z.B. in Power Fuels begründet werden. Zum anderen werden hohe Effizienzgewinne für die kommenden Dekaden angenommen. Diese werden jedoch von einer Meta-Studie als nicht belegbar betitelt. [8]

2.1 Regenerative Kraftstoffe

Das Technologiefeld „Power-to-X“ umfasst unterschiedliche Methoden zur Speicherung oder anderweitigen Nutzung von elektrischem Strom durch Wandlung in andere Energieformen wie Wärme, Kraftstoffe sowie in chemische Grundstoffe. Eine weiterführende Spezifizierung wird unter dem Begriff „Power-to-Fuel“ abgegrenzt. Dabei werden aus regenerativ hergestelltem Strom, in Verbindung mit Kohlenstoffdioxid oder Stickstoff, flüssige und gasförmige Treibstoffe hergestellt.

Im Flugverkehr werden aktuell fossile Kraftstoffe mit der Spezifikation Jet A-1 verwendet [25]. Dieser ist flüssig und gehört ähnlich wie Diesel zu den Mitteldestillaten. Aufgrund der Umgebungsbedingungen in großer Flughöhe ist der Kraftstoff hohen Qualitätsanforderungen ausgesetzt. Es muss sichergestellt sein, dass dieser bei niedrigen Temperaturen sowie tiefen Luftdruck einsatzfähig bleibt. [26]

In der Überseeschifffahrt wird überwiegend der Treibstoff *Marine Diesel Oil (MDO)* verwendet [27]. In jüngerer Vergangenheit setzen einige Unternehmen auf die Umstellung zu fossilem Erdgas. Das Gas wird in seiner verflüssigten Form *liquid natural gas (LNG)* bezeichnet. LNG weist im Gegensatz zu dem unter Normalbedingungen flüssigen Konkurrenzprodukt einen geringeren CO₂-Ausstoß bei gleicher gewandelter Energiemenge auf. Zudem wird der Anteil an Stickoxiden im Rauchgas deutlich verringert. [28]

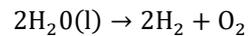
Um Stoffe synthetisch herzustellen, die ähnliche physikalische Eigenschaften wie herkömmliche Treibstoffe haben, steht im Bereich der Flüssigkraftstoffe unter anderem die Fischer-Tropsch-Synthese als etablierte Technologie zur Verfügung [29]. Um ein Alternativprodukt zu LNG bereitzustellen, kann für die Produktion von Methan die Sabatier-Reaktion verwendet werden. Das synthetisierte Produkt weist nahezu die identischen physikalischen Eigenschaften wie die fossilen Kraftstoffe auf. Der produzierte Treibstoff kann theoretisch in konventionellen Verbrennungskraftmaschinen wie Schiffsmotoren verwendet werden. [30]

Die Herstellung regenerativer Kraftstoffe kann über verschiedene Wege realisiert werden. Alle Bereitstellungspfade beginnen mit einem Elektrolyseprozess zur Herstellung von Wasserstoff durch den Einsatz von Wasser und elektrischem Strom aus erneuerbaren Quellen. Ohne zusätzliche Umwandlungsschritte kann Wasserstoff für Transportmittel, sektorenübergreifend im Strom- und Wärmesektor und bei chemisch-technischen Prozessschritten eingesetzt werden. Die Verwendung von reinem Wasserstoff im Flugverkehr sowie für die Überseeschifffahrt unterliegt jedoch hohen Markteintrittsbarrieren. Diese basieren auf begrenzenden und aufwendigen Speichersystemen, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden. Für eine Weiterverarbeitung des Wasserstoffs stehen unterschiedliche Syntheseverfahren zur Verfügung, welche sich sowohl aus verfahrenstechnischer Sicht als auch in den resultierenden Produkten unterscheiden. Um eine Kraftstoffsynthese durchzuführen werden die Ausgangsstoffe Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid benötigt. Anschließend wird aus den beiden Stoffen ein Synthesegas erzeugt, welches als Edukt für die Synthese benötigt wird. Ebenfalls kann Wasserstoff in Verbindung mit Stickstoff im Haber-Bosch-Verfahren zu Ammoniak weiterverarbeitet werden. Die Verwendung von reinem Wasserstoff und Ammoniak im Transportsektor wird jedoch in den Berechnungen nicht weiter betrachtet. [31]

2.1.1 Elektrolyse

Um den Ausgangsstoff Wasserstoff zu produzieren, wird in einem Elektrolyseverfahren unter Energiezufuhr Wasser in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Die Zerlegung erfolgt mit elektrischem Gleichstrom. Die theoretisch aufzuwendende elektrische Energiemenge liegt unter Normalbedingungen bei 3,55 kWh/m³_{H₂} und entspricht dem oberen

Heizwert von Wasserstoff. In der Gleichung werden das Reaktionsschemata sowie der notwendige theoretische Energiebedarf dargestellt. [32]



$$\Delta H = -285,8 \text{ kJ/mol}$$

Reale Anlagen benötigen in Abhängigkeit der eingesetzten Verfahren verlustbedingt mehr Primärenergie. Die Effizienz ergibt sich aus der Art des verwendeten Elektrolyseurs. Dabei spielt die verwendete Hardware, bestehend aus Elektroden, Elektrolyten und Membranen, eine Rolle. Des Weiteren bestimmen die verfahrenstechnischen Wandlungsprozesse und die Betriebsführung die Effizienz. Es gibt drei relevante Gruppen von Elektrolyseuren, die nachfolgend beschrieben werden.

Die **Alkalische Elektrolyse** (AEL) verdankt ihren Namen der verwendeten wässrigen Elektrolytlösung mit hohem pH-Wert. Die metallische An- und Kathode hängen in durch eine permeable Membran getrennten Halbzellen. Wird eine Spannung angelegt entsteht an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff. Um einen Lösungsausgleich zu erhalten, wandern negativ geladene OH-Ionen durch das Diaphragma kathodenseitig zur Anode. Besonders hervorzuheben sind die hohe Langzeitstabilität sowie die aktuell vorliegenden geringen Investitionskosten. Zudem weist diese Technologie den aktuell höchsten Effizienzwert im Vergleich zu den anderen Elektrolyseurarten auf und gilt als die am längsten erforschte sowie weit verbreitetste Elektrolyseurform. Nachteilig zu erwähnen ist, dass die AEL eine vergleichsweise träge Laständerung sowie einen geringen Teillastbereich aufweist. Somit ist diese nur bedingt für ein angebotsseitiges volatiles erneuerbares Stromangebot geeignet. [33]

Die **Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse** (PEM-EL) arbeitet hingegen in einem sauren Lösungsmilieu. Um die Elektroden vor Korrosion zu schützen sind diese aus Edelmetallen gefertigt. Die Trennung der Halbzellen erfolgt mit einer gasdichten Membran. Die PEM-EL ermöglicht durch einen Lastgradienten von 10 %/s ein zehnmal höheres volatiles Stromaufnahmepotential im Vergleich zur AEL. Zudem kann die Zelle in niedrigeren Teillastbereichen betrieben werden [34]. Das Entwicklungsstadium steht kurz vor der industriellen Umsetzung [31]. Für diese Technologie werden Wirkungsgrade bis 70 % vorausgesagt [35].

Die **Solid-Oxid-Elektrolyse** (SOEL) oder auch Hochtemperaturelektrolyse verwendet zur Trennung der Halbzellen ein festes Oxid, durch welches Sauerstoff-Ionen diffundieren können. Durch die hohen Betriebstemperaturen liegt der Ausgangsstoff Wasser gasförmig vor. Im Gegensatz zu den anderen Elektrolysen kann neben der elektrischen Energie auch Wärmeenergie zur Spaltung von Wasser genutzt werden. Daraus folgt, dass höhere Wirkungsgrade erreicht werden können. Aus den Gegebenheiten des Temperaturniveaus kann

jedoch geschlussfolgert werden, dass die Reaktionszeit ein Problem bei einer volatilen Lastabnahme darstellt. Die SOEL befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Aktuell verfügbare Anlagen weisen lediglich Leistungsbereiche weit unter 1 MW auf, jedoch bietet diese Technologie ein großes Potential für zukünftige Szenarien [35]. In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der unterschiedlichen Elektrolysen dargestellt. Aufgrund betriebstechnischer Vorteile und des technischen Reifegrades wird für die Kraftstoffkostenberechnung die PEM-Elektrolyse verwendet.

Tabelle 1 – Eigenschaften von unterschiedlichen Arten der Elektrolyse

	AEL	PEM-EL	SOEL
Wirkungsgrad [%] [36]	68	63	83
Verfügbarer Anlagenleistungsbereich [MW]	< 130 [34]	<6 [34]	<0,018 [37]
Temperaturbereich [°C] [34]	50-80	50-80	600-900
Teillastbereich [%]	20-100 [34]	5-100 [38]	-
Lastgradient [%/s] [38]	< 1	10	0,05
Lebensdauer [h] [38]	90.000	50.000	-

2.1.2 Kohlenstoffquellen

Um Kohlenstoffdioxid für die Produktion eines synthetischen Kraftstoffs auf Kohlenwasserstoffbasis bereitstellen zu können werden verschiedene Methoden verwendet. Zum einen ist es möglich das CO₂ aus Industrie- oder Verbrennungsprozessen zu gewinnen. Zum anderen kann dieses aus der Umgebungsluft gefiltert werden. Als industrielle Punktquellen werden neben der chemischen Industrie die Stahl- und Zement-Industrie von systematischen Studien favorisiert. [8]

Kohlenstoffdioxid liegt heute in der atmosphärischen Umgebungsluft in einer natürlichen Konzentration von etwa 400 ppm vor und ist von essentieller Bedeutung für das Leben auf der Erde. Es wird im Kohlenstoffkreislauf, einem System bestehend aus einer Kaskade chemischen Wandlungsprozessen kohlenstoffhaltiger Verbindungen, für verschiedene Prozesse benötigt. Pflanzen assimilieren CO₂ und verwenden dies zum Aufbau von organischen Kohlenstoffverbindungen. Außerdem entsteht es bei der Veratmung, einem Stoffwechselfvorgang tierischer Zellen. Organische Stoffe werden zur Energiegewinnung oxidiert. Während dieses Vorgangs wird als Nebenprodukt CO₂ abgeschieden. Aus diesem Kreislauf hat sich über die Zeit ein stabiles Erdsystem entwickelt. Durch den zunehmenden

Energiebedarf durch die Industrialisierung wurden vermehrt fossile Energieträger für Prozesse und die Wärmebereitstellung benötigt. Fossile Energieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl basieren auf Abbauprodukten von toten Tieren und Pflanzen. Wird ein solcher Energieträger beispielsweise in einem Kraftwerk verbrannt, wird der gespeicherte Kohlenstoff in Form von CO₂ erneut der Atmosphäre übergeben. Um langfristig wieder eine Stabilisierung des Klimasystems zu erreichen ist es notwendig, weniger fossil gespeichertes CO₂ zu emittieren oder dieses im Sinne eines Kreislaufes wiederzuverwenden. In den folgenden Abschnitten werden die beschriebenen Quellen für die CO₂-Bereitstellung aufgelistet sowie die technischen Herangehensweisen zur Abtrennung beschrieben.

2.1.2.1 Kohlenstoffdioxid aus Verbrennungsprozessen

Verbrennungsprozesse finden in Kraftwerken, Verbrennungsmotoren oder Heizkesseln statt. Durch die Reaktion eines Brenn- oder Kraftstoffes mit Sauerstoff wird chemisch gespeicherte Energie in technische nutzbare Energie gewandelt. Zum einen kann die durch die Oxidation freigesetzte Wärme direkt als Endenergie genutzt werden oder durch Kraftmaschinen in mechanische Energie umgewandelt werden. Diese mechanische Energie kann wiederum direkt für technische Anwendungen verwendet, oder in einem weiteren Wandlungsschritt in elektrische Energie gewandelt werden.

Fossile Kraftwerke werden im Zuge der Dekarbonisierung einen immer kleineren Stellenwert in der Energiewirtschaft einnehmen [39]. Es lassen sich jedoch technische Möglichkeiten zur Verringerung der Emissionen durch CO₂-Abtrennverfahren realisieren. Als Optionen für die Abtrennung lassen sich die Maßnahmen in drei Bereiche einordnen:

- Post Combustion: CO₂-Abtrennung erfolgt nach der Verbrennung
- Pre Combustion: CO₂-Abtrennung erfolgt vor der Verbrennung
- Oxyfuel-Prozess: Erleichterte Abtrennung des CO₂ nach der Verbrennung

Beim **Post-Combustion** Verfahren wird CO₂ aus dem Rauchgas abgeschieden. Aufgrund der geringen CO₂-Konzentration im Abgas müssen große Gasvolumina behandelt werden. Als Abtrennverfahren werden unterschiedliche Technologierouten beschrieben. Verfügbare Verfahren sind neben der Amin-Wäsche unterschiedliche Membranverfahren. Bei der Amin-Wäsche wird das Rauchgas mit einer wässrigen Monoethanolamin- (MEA) oder Methyl-Diethanolamin-Lösung (MDEA) in Berührung gebracht. Die Lösungen absorbieren das CO₂ durch ihre hohe Basizität. Um das CO₂ von dem Trägermaterial abzutrennen, muss in einem zweiten Prozessschritt eine Regeneration stattfinden. Für die Desorption wird das Lösungsmittel auf etwa 100 °C erhitzt. Der Gesamtenergieeinsatz wird in der Literatur mit 2,5

bis $3,45 \text{ MJ/t}_{\text{CO}_2}$ angegeben. Wird diese aminbasierte CO_2 -Abtrennung in einem Kohlekraftwerk umgesetzt, wird ein Wirkungsgradverlust von 7 bis 13 % erwartet. [40]

Eine weitere Methode zur CO_2 -Abtrennung bietet das **Pre-Combustion** Verfahren. Der eingesetzte Kraftstoff wird vor der Verbrennung gegebenenfalls vergast und anschließend reformiert. Entstehendes Kohlenstoffmonoxid wird in einem Shift-Reaktor mit Wasserdampf zu CO_2 und H_2 umgewandelt. Vergasung und Reformierung werden üblicherweise zwischen 30 und 60 bar durchgeführt. Das Gas mit hohem CO_2 -Partialdruck ermöglicht eine physikalische Wäsche oder eine Membranabtrennung, welche geringere Energieaufwendungen im Gegensatz zur Amin-Wäsche benötigt. Anschließend steht der Wasserstoff für die Verbrennung zur Verfügung. Ein aktuelles Forschungsprojekt mit verschiedenen europäischen Partnern aus Forschung und Wirtschaft ist *HyMethShip*, welches die Pre-Combustion Methode in Verbindung mit einem innovativen Schiffsantriebskonzept untersucht und als Treibstoff Methanol verwendet. Vor der Verbrennung wird dabei Methanol zu Wasserstoff reformiert und CO_2 abgespalten. [41]

Das **Oxyfuel-Verfahren** bietet eine weitere Möglichkeit der CO_2 -Abtrennung und wird zumeist in Verbindung mit Gasturbinen untersucht. Für die Verbrennung wird anstelle von Umgebungsluft reiner Sauerstoff verwendet. Es resultiert ein geringeres Rauchgasvolumen mit den wesentlichen Bestandteilen Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid. Durch Herunterkühlung des Rauchgasstroms kann das enthaltene Wasser auskondensiert und anschließend abgetrennt werden. Das CO_2 steht nun ohne weitere technische Aufbereitung in einer sehr hohen Konzentration zur Verfügung. Zudem entstehen durch die Vermeidung von Umgebungsluft als Trägergas keine Stickoxide. Als Nachteil wird der hohe Energieaufwand zur Herstellung des reinen Sauerstoffs angeführt. Des Weiteren verursacht die notwendige Rauchgaszirkulation zur Regulierung der Feuerraumtemperatur einen hohen anlagentechnischen Aufwand. Die Integration des Oxyfuel-Verfahrens in einen konventionellen Schiffsmotor wird in einem aktuellen Forschungsprojekt angestrebt. [42]

2.1.2.2 Kohlenstoffdioxid aus Industrieprozessen

Bei der Produktion von **Stahl** werden in Europa etwa 5 % der gesamten Treibhausgasemissionen verursacht [43]. Derzeit wird jedoch eine Methode entwickelt, welche eine klimafreundlichere Produktion ermöglichen soll. Die Direktreduktion ist ein bekanntes Verfahren um Eisenerz in seine metallische Form zu überführen. Die *ArcelorMittal Hamburg GmbH* betreibt ein Stahlwerk, welches nicht wie herkömmliche Werke Kohle, sondern Erdgas für die Erhitzung und die Reduktion verwendet [44]. Unter dem Verbrauch von Erdgas wird Kohlenmonoxid erzeugt und Wasserdampf an einem Katalysator in Wasserstoff umgewandelt.

Das erzeugte Reaktionsgas wird anschließend verwendet, um durch einen Oxidationsprozess das Erz in den sogenannten Eisenschwamm umzuwandeln. Dieses Zwischenprodukt muss anschließend im Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen, gegossen und zu Walzdraht weiterverarbeitet werden. Wird das Erdgas durch regenerativen Wasserstoff ersetzt, ist es folglich möglich diesen Prozess weitestgehend zu dekarbonisieren. Die Stahlindustrie wird daher nur kurz- bis mittelfristig als potentielle CO₂-Quelle angesehen. In Deutschland wurden im Jahr 2018 eine Produktionsmenge von 0,7 Mio. t, also etwa 1,7 % des produzierten Stahls mit dem klimafreundlicheren Verfahren produziert. [43, 45, 46]

Um metallisches **Aluminium** herzustellen, wird als Ausgangsstoff Aluminiumoxid verwendet. Im Hall-Héroult-Prozess wird durch eine Schmelzflusselektrolyse das Oxid reduziert. Der entstehende Sauerstoff bindet sich an den Kohlenstoff, welcher durch das Abbrennen der Kohlenstoffanode bereitgestellt wird. Als Abgas des Reduktionsprozesses entsteht Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid. Pro Tonne Aluminium wird so ein Äquivalent von 1,53 bis 1,65 t CO₂ erzeugt. Für die Aluminiumproduktion werden immense Elektrizitätsmengen verwendet. Im Jahr 2018 wurden in Europa 8 Mio. t und weltweit 62,6 Mio. t Aluminium durch Verhüttung produziert. [47–49]

Beton ist einer der wichtigsten Baustoffe der Gegenwart. Neben den Bestandteilen Kies, Sand und Wasser wird für die Betonherstellung **Zement** als Bindemittel verwendet. Die Herstellung von Zement ist ein emissionsintensiver Industrieprozess. Etwa 8 % der globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2014 lassen sich auf die Zement-Industrie zurückführen [50]. Im Jahr 2016 produzierte China 2,41 Mrd. t Zement. Das entspricht mehr als der Hälfte der weltweiten Produktionsleistung. Zweitplatziert ist bei der Zementproduktion Indien mit 0,29 Mrd. t. Der drittgrößte Produktionsstandort mit 0,17 Mrd. t Zement ist die Europäische Union [51]. Die Emissionsintensität lässt sich insbesondere auf zwei Prozesse zurückführen. Für die Herstellung wird das Ausgangsmaterial Kalkstein zu Zementklinker gebrannt. Um die benötigten Temperaturen von 1.450 °C zu erreichen werden große Mengen an Brennstoff verwendet. Die Wärmebereitstellung führt zu hohen energiebedingten Emissionen. Außerdem wird durch das Brennen der Kalk in einer Reaktion entsäuert. Die prozessbedingte chemische Reaktion führt zu Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Auf die Entsäuerung im Hochofen entfallen knapp 50 % der Treibhausgas-Emissionen des Gesamtprozesses. Für die gesamte Produktionskette je Tonne Zement, ergibt sich ein durchschnittliches Treibhauspotential von 587 kg CO₂-eq. [50]

2.1.2.3 Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft

Die Direct-Air-Capture Technologie, bezeichnet ein Verfahren zur Abtrennung von CO₂ aus der Umgebungsluft. Für die Separation kann auf verschiedene Abtrennverfahren zurückgegriffen werden, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Neben der amin-basierten Filtrierung unter Verwendung flüssiger Absorptionsmittel und der Karbonatisierung wird heutzutage vorwiegend die Festbettadsorption angewandt. Hierbei wird in einem ersten Schritt Umgebungsluft angesaugt und durch Festbettfilter geleitet, welche das enthaltene CO₂ adsorbieren. Ist das Filtermaterial gesättigt, wird dieses in einem zweiten Schritt von der Umgebungsluft abgetrennt und erwärmt. Kohlenstoffdioxid desorbiert von der Oberfläche und kann als reiner Gasstrom entnommen werden. Anschließend beginnt der Prozess von Neuem. Neben dem benötigten Strom für Ventilatoren und Pumpen wird Prozesswärme mit einem Temperaturniveau von etwa 100 °C benötigt. Pilotanlagen dieses Verfahrens werden derzeit u. a. von der Firma *Climeworks AG* in Zürich betrieben. [52]

Neben dem Niedertemperatur-Adsorptionsverfahren bei 100 °C existiert auch ein Hochtemperatur-Absorptionserfahren. Mit Absorption wird die Aufnahme oder das „Lösen“ eines Moleküls in einer anderen Phase beschrieben. Ein Start-up aus Kanada nutzt Kaliumhydroxid als Absorber. Die Lösungsmittel produzieren Abfall bzw. müssen teilweise wiederaufbereitet werden. Im Großmaßstab müsste der Absorber kontinuierlich produziert und dem Prozess hinzugefügt werden. [53]

Eine kritische Betrachtung der DAC-Technik ist beim Einsatz unter verschiedenen klimatischen Bedingungen notwendig. Bedenken werden von der *Climeworks AG* für den Betrieb in heißeren Regionen geäußert [54]. Die Prozesseigenschaften sind abhängig vom Standort und von der Jahreszeit. Eine hohe Effizienz wird bei tiefen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit (10 °C und 50 % rel. Luftfeuchte) erreicht. Nimmt die Temperatur zu und die relative Feuchtigkeit ab (35 °C und 30 % rel. Luftfeuchte), wie es in der *Middle East & North Africa-Region* (MENA-Region) häufig vorkommt, so kann es zu einer Kapazitätsreduktion von bis zu 30 % kommen. Zudem ist unklar, ob der Betrieb in Wüstenregionen ohne eine Vorbehandlung der salzhaltigen Meeresluft realisierbar ist. Sensible Anlagentechnologien wie Ventilatoren und Filter müssen erst auf den Betrieb in Wüstenregionen ausgelegt werden. Demnach ist bei einer industriellen PtX-Produktion auf Basis der CO₂-Bereitstellung durch DAC in Nordafrika mit verminderter Effizienz und Anlagenlebensdauer zu rechnen. [54]

Da in industriellen Sektoren eine Dekarbonisierung angestrebt wird, können ausschließlich nicht vermeidbare CO₂-Emissionen als Quelle für die regenerative Kraftstoffproduktion angesehen werden. Hierfür können beispielsweise die in Kapitel 2.1.2 aufgeführten

prozessbedingten Emissionen der Aluminium- und Zementproduktion angesehen werden. Während der prognostizierte Treibstoffbedarf bis in das Jahr 2050 auf dem gleichen Niveau vorhergesagt wird, ist aufgrund der Bevölkerungsentwicklung, der Urbanisierung und einem zunehmenden Infrastrukturaufbau ein Wachstum des Zementmarktes um 12-23 % zu erwarten. Daher kann dieser Industriesektor als mittelfristige CO₂-Quelle angesehen werden [50]. Um den Bedarf an CO₂ langfristig zu decken verweist die Wissenschaft auf die DAC-Technologie. Für den Bedarf an Power Fuels soll im Jahr 2050 durch DAC etwa 80 % des benötigten CO₂ aus der Umgebungsluft gefiltert werden [8].

2.1.3 Kraftstoffsynthese

Um Kohlenstoffdioxid für einen Syntheseprozess zu verwenden, wird es in einem ersten Zwischenschritt in Kohlenstoffmonoxid umgewandelt. Hierfür wird es in einem Konvertierungsreaktor mit Wasserstoff in einer Gleichgewichtsreaktion, der umgekehrten Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS), gewandelt. Die Reaktionsenthalpie von 41,2 kJ·mol⁻¹ weist auf eine endotherme Reaktion hin. Um diese Reaktion anzuregen werden hohe Temperaturen von bis zu 900 °C benötigt, damit ein adäquater Gleichgewichtsumsatz erreicht wird. Das Synthesegas steht nach Entfernung des durch die Reaktion entstehenden Wassers sowie der Einstellung des benötigten stöchiometrischen Verhältnisses aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff für einen Syntheseprozess zur Verfügung. [55]

Die folgende Gleichung zeigt die Hydrierung von Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenwasserstoffen, und wird Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) genannt. Aus thermodynamischer Sicht handelt es sich hierbei um eine stark exotherme Reaktion. [55]



Ausgehend von den Prozessbedingungen findet unter Verwendung von Eisen-, Cobalt-, Nickel oder Ruthenium-Katalysatoren eine Aufbaureaktion zu Paraffinen, Alkenen sowie Alkoholen statt. Art und Verteilung der Kohlenwasserstoffe wird durch die Synthesebedingungen Temperatur, Druck, Synthesegas-Zusammensetzung und der Katalysatorwahl bedingt. Da es sich um keine volumenkonstante Reaktion handelt, wirkt der Reaktionsdruck signifikant auf den Gleichgewichtsumsatz ein. Durch die aus der Reaktionsgleichung ableitbare Volumenkontraktion, geht folglich eine Erhöhung des Prozessdrucks mit einer Umsatzsteigerung einher. Je höher der für die Reaktion gewählte Druck ist, desto langkettiger fällt das zu bildende Produkt aus. Als Reaktionsprodukt werden in jedem Prozess Kohlenwasserstoffe in unterschiedlichen Kettenlängen erzeugt. Wie auch bei der RWGS

entsteht als Nebenprodukt Wasser. Durch die Abführung des Teilproduktes Wasser, kann die Gleichgewichtsreaktion in Richtung der Produkte verlagert werden. [55]

Der theoretische Wirkungsgrad im Prozess liegt aufgrund von Verlusten bei 66,3 %. Die erreichbare Prozesseffizienz wird in der Literatur aktuell mit 60 % angegeben [56]. Die freiwerdende Wärmemenge der exothermen Reaktion kann jedoch zur Erhöhung des Wirkungsgrades des Gesamtprozesses beitragen.

2.2 Flugverkehr

Der Flugverkehr ermöglicht einen schnellen und weltweiten Transport von Passagieren und Gütern. Die Luftverkehrswirtschaft weist im Jahr 2018 4,3 Mrd. Fluggäste [7], 63,7 Mio. t transportierte Fracht [57] sowie 62 Mio. in Verbindung stehende Arbeitsplätze auf und ist einer der wesentlichen Bestandteile des modernen Lebens und des wirtschaftlichen Wachstums [58].

Allerdings ist der Luftverkehr durch die negative Umwelteinwirkung der Flugzeuge immer größerer Kritik ausgesetzt. Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen und anderen Luftschadstoffen wird die Erzeugung von Kondensstreifen kritisiert. Die damit einhergehende Veränderung der Wolkenbildung führt zur Verringerung der Wärmestrahlung der Erde und trägt damit auf verschiedenen Ebenen zur Klimaerwärmung bei. [59]

Um den Flugverkehr klimafreundlicher zu gestalten, gibt es einen neuen Ansatz, bei dem fossile Treibstoffe durch Wasserstoff ersetzt werden. Der *H2Fly GmbH* gelang der erste wasserstoffelektrische Flug bereits im Jahr 2016. Das viersitzige Passagierflugzeug *HY4*, speist seinen Elektromotor ausschließlich über ein Hybridsystem von Brennstoffzellen und Batterie [60]. Auch die Industrie sieht den CO₂-neutralen Energieträger als eine mögliche Option. Airbus will bis 2035 Flugzeuge für den kommerziellen Luftverkehr mit wasserstoffbetriebenen Gasturbinen betreiben. Der Wasserstoff soll hierbei in flüssiger Form im hinteren Teil des Flugzeugs eingelagert werden und neben den Turbinen gegebenenfalls auch Brennstoffzellen für eine zusätzliche Stromproduktion versorgen. Unter der Berücksichtigung des Lagersystems ergibt sich bedingt durch die volumetrische Energiedichte des Wasserstoffs eine Reichweitenbegrenzung. Für die geplanten Flugzeuge wird eine Reichweite von 1850 km bzw. 3700 km angegeben. Daher ist dieses Konzept nur bedingt für den interkontinentalen Flugverkehr geeignet. [61]

Neben einem Wechsel der Antriebseinheit besteht ebenfalls die Möglichkeit Power Fuels als Kraftstoffe in der bestehenden Technik zu verwenden. Hierdurch würde die Möglichkeit bestehen, dass die aktuell verbauten Antriebseinheiten in den Flugzeugen sowie die Infrastruktur an Flughäfen weiter genutzt werden können. Da die gravimetrische Energiedichte der regenerativ hergestellten Power Fuels dem aktuell verwendeten Kraftstoff mit der Spezifikation Jet A-1 entspricht, würde sich folglich keine Einschränkung des Flugbetriebs in Bezug auf die Reichweite ergeben. [62, 63]

2.2.1 Passagieraufkommen & Luftfrachtraten

Um in Zukunft einen nachhaltigen Luftverkehr zu gewährleisten, ist es notwendig auf leistungsfähige und zugleich umweltschonende Technologien innerhalb dieser Verkehrsinfrastruktur zu setzen. Eine kontinuierlich steigende globale Nachfrage nach schnellem Personen- und Warentransport lässt diesem Sektor eine immer bedeutendere Rolle im Klimaschutz zukommen. Seit 1990 ist der Personenluftverkehr von rund 2 Mrd. Passagieren um mehr als 100 % auf 4,3 Mrd. im Jahr 2018 gestiegen. Allein Im Jahr 2018 wuchs das globale Passagieraufkommen um 6,7 % gemessen an den *revenue passenger kilometers* (RPK). [7]

In Abbildung 2 werden die Anteile des Passagier- und Frachtluftverkehrs für die in Verbindung stehenden Regionen für das Jahr 2019 dargestellt. Der Passagierflugverkehr bemisst sich an der Personentransportleistung in RPK. Je größer ein Pfeil abgebildet wird, desto größer ist die Personentransportleistung. Der Frachtluftverkehr richtet sich nach der gewichtsbezogenen Transportleistung. Es ist zu erkennen, dass der größte Anteil im Passagierverkehr zwischen Asien, Nord-Amerika und Europa zu finden ist. Eine ähnliche anteilige Verteilung ist im Frachtverkehr zu finden.

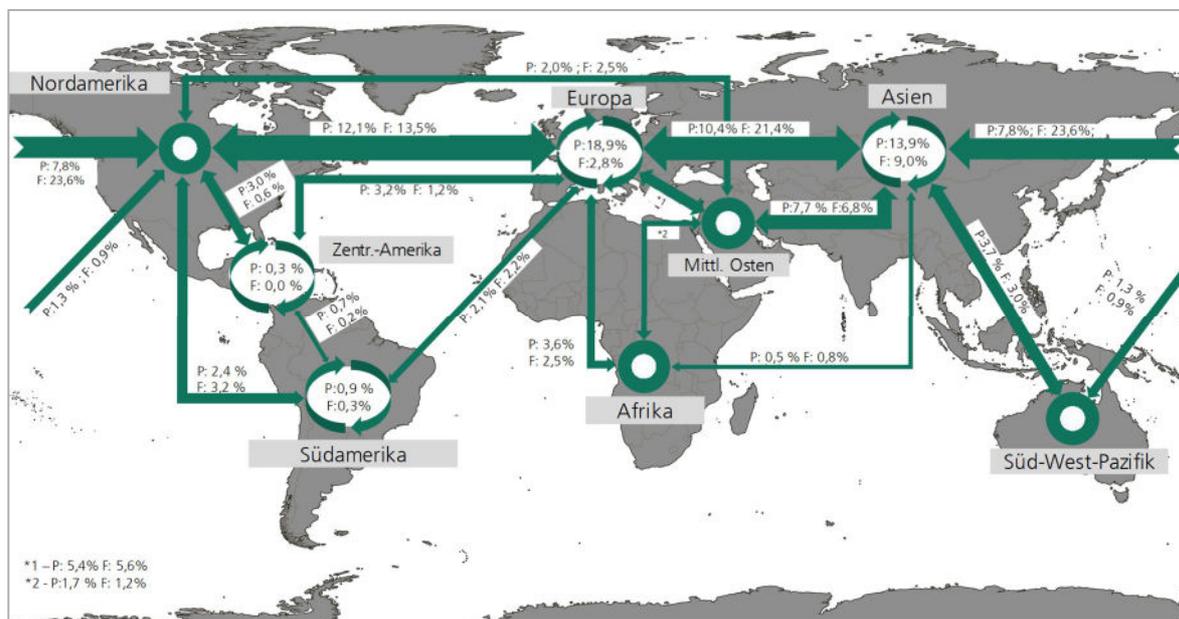


Abbildung 2 – Regionale Streckenanteile des Passagier (P)- und Frachtflugverkehrs (F), eigene Darstellung auf Basis von [64]

In Abbildung 3 setzt sich der Graph bis 2016 aus den historischen Daten zusammen. Ab 2016 basieren die Werte auf unterschiedlichen Vorhersagen für das weltweite Flugaufkommen in RPK. Es wird mit einer Verdoppelung bis zur Verdreifachung der Verkehrsleistung bis in das Jahr 2050 gerechnet.

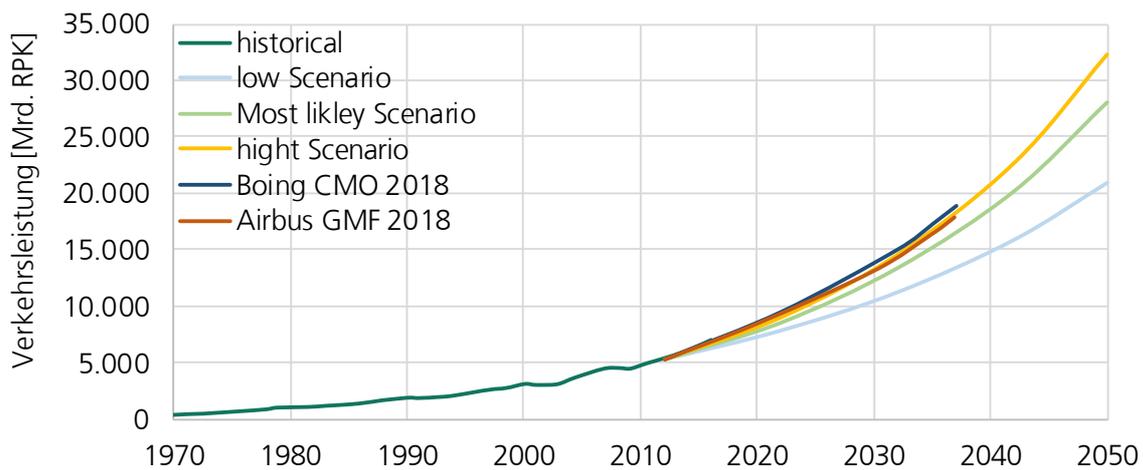


Abbildung 3 – Prognosen für den Passagierluftverkehr, eigene Darstellung auf Basis von [7]

2.2.2 Treibhausgasemissionen

Bedingt durch den Verbrauch von Kerosin durch Flugzeugtriebwerke werden während des Verbrennungsvorgangs Kohlenstoffdioxid und Wasser sowie weitere Emissionen erzeugt. Pro verbrauchter Tonne Kerosin entstehen etwa 3,15 Tonnen Kohlenstoffdioxid. [64]

Abbildung 4 zeigt Emissionen und Effizienzeffekte des von Europa ausgehenden Flugverkehrs. Das linke Teilbild zeigt die CO₂-Emissionen aus dem Flugverkehr von oder zum europäischen Kontinent. Die unterschiedlichen Farben stellen hierbei die jeweiligen mit Europa in Verbindung stehenden Regionen dar. Im Zeitraum zwischen 2013 und 2019 ist eine CO₂-Emissionssteigerung um etwa 30 % erkennbar. Gestaffelt nach den angeflogenen Regionen ist ersichtlich, dass der innereuropäische, im Vergleich zum außereuropäischen Luftverkehr den größten Beitrag zu den CO₂-Emissionen leistet. Das rechte Teilbild zeigt die Entwicklung des Flugaufkommens zwischen den Jahren 2013 und 2019 in Bezug auf die Emissionen nach angeflogenen Regionen. Unterhalb der 0 %-Linie sind die Effizienzgewinne aufgetragen, welche innerhalb des Flugbetriebs erreicht wurden. Die Gewinne konnten beispielsweise durch neuere und sparsamere Flugzeuge oder höhere Auslastungsraten erreicht werden. Oberhalb der Linie ist die Steigerung des Flugaufkommens dargestellt. [65]

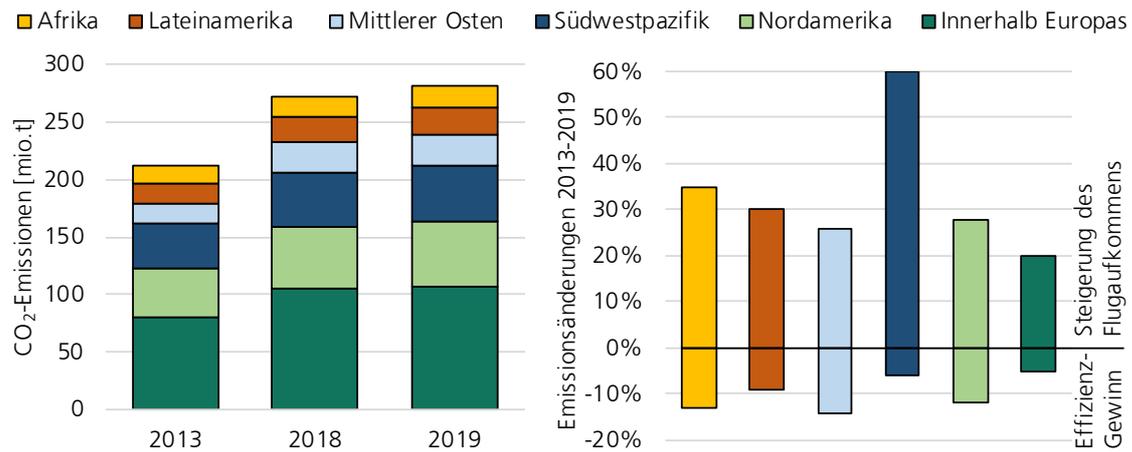


Abbildung 4 – Emissionen und Effizienzeffekte des von Europa ausgehenden Flugverkehrs, eigene Darstellung auf Basis von [43]

Im Flugverkehr konnte in den letzten Jahren ein geringerer Treibstoffverbrauch je spezifischer Verkehrsleistung festgestellt werden. Zwischen 2000 und 2010 wurde eine jährliche Effizienzsteigerung von rund 1,9 % bestätigt und in der darauffolgenden Dekade von jährlich 1,4 %. Eine weiterführende Prognose der Lufthansa für den Zeitraum 2016 bis 2035 sagt mit einer Senkung der Verbräuche von jährlich 1 % demnach eine Stagnation voraus [7]. Aus diesem Grund kann die Weiterentwicklung von effizienteren Flugzeugen das prognostizierte Verkehrsaufkommen nicht kompensieren und es bedarf weiterer Anpassungen, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen. Demzufolge ist es für einen klimafreundlichen Flugverkehr unabdingbar, CO₂-neutrale Technologien zu verwenden um dem mit der gesteigerten Nachfrage einhergehenden Trend entgegenzuwirken.

2.3 Maritimer Frachtverkehr

Die maritime Transportbranche ist das Rückgrat des Welthandels. Die angebotene Dienstleistung umfasst hierbei eine physikalische Bewegung von Gütern zwischen Angebots- und davon räumlich getrennten Bedarfsorten [66]. Es werden circa 80 % der global gehandelten Güter ganz oder teilweise über den Seeweg befördert. Im Jahr 2018 wurden 11 Mrd. t Seefracht transportiert [67].

2.3.1 Welthandelsflotte

Der Seefrachtverkehr kann in unterschiedliche Transportklassen eingeteilt werden. Die Klassen werden in Abbildung 5 dargestellt und umfassen Container, andere Trockenfracht, Bulk-Carrier und Tanker. Tanker verschiffen vorrangig flüssige oder gasförmige Stoffe wie Rohöl, Flüssiggas oder flüssige Chemikalien. Massengutfrachter, auch Bulk-Carrier genannt, werden für den Transport von losem Massenschüttgut wie Kohle, Zement, Getreide oder Bauxit für die Aluminiumherstellung eingesetzt. Mit „anderer Trockenfracht“ werden alle übrigen, nicht flüssigen oder nicht in Containern transportierbare Güter wie Maschinen oder Fahrzeuge verstanden. Bezogen auf die Masse entfällt ein Drittel der über See gehandelten Güter auf die Containerschifffahrt. [67]

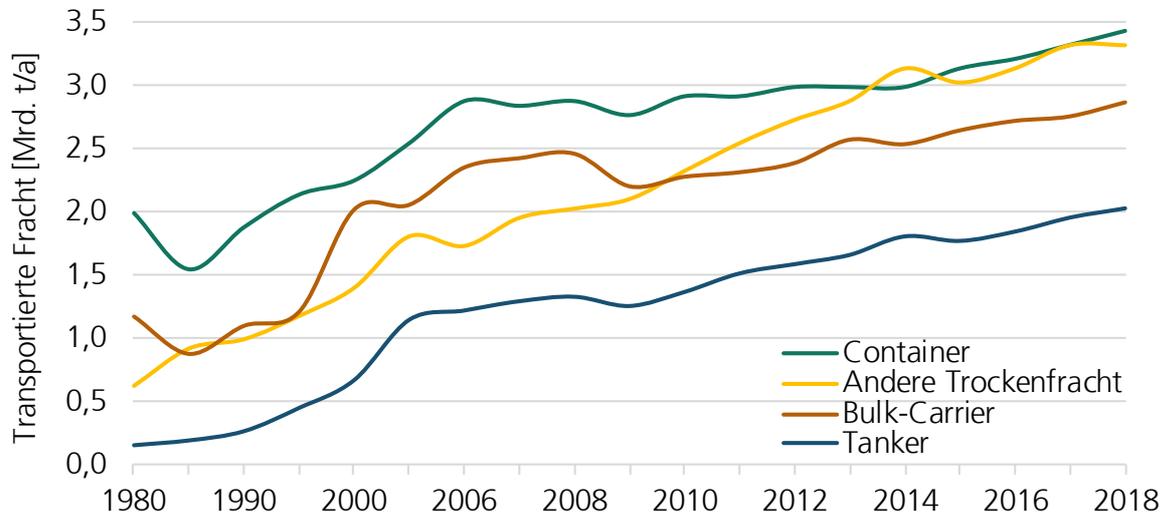


Abbildung 5 – Zeitliche Entwicklung der transportierten Frachtmenge je Transportklasse, eigene Darstellung auf Basis von [67]

In Abbildung 6 ist die Zusammensetzung der Welthandelsflotte nach den Anteilen der jeweiligen Kategorie dargestellt. Insgesamt umfasst die Flotte im Jahr 2018 eine Zahl von 52.000 Schiffen. Es ist zu erkennen, dass trotz der vergleichsweise geringen Anzahl, etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen auf die Containerschifffahrt zurückzuführen ist. Eine zunehmende Elektrifizierung der Energiesysteme bewirkt eine Verringerung des Bedarfs an fossilen

Kraftstoffen wie Kohle und Öl. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil von Tankern und Bulk-Carrier in den nächsten Jahren rückläufig sein wird [66]. Folglich wird in Zukunft die Containerschifffahrt eine dominierende Position im Welthandel einnehmen.

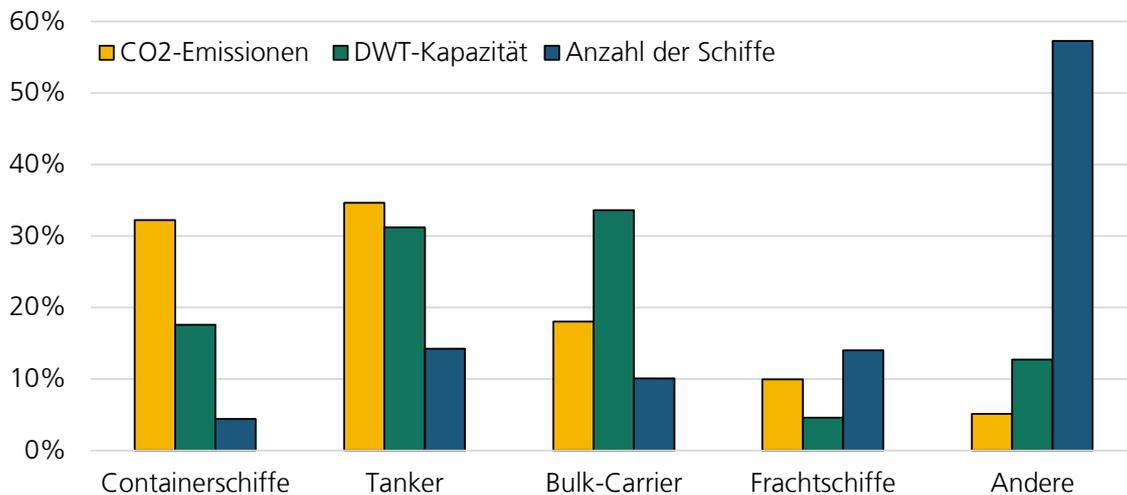


Abbildung 6 – Eigenschaften der Transportklassen, eigene Darstellung auf Basis von [67]

2.3.2 Containerschifffahrt

Der Containerschiffsverkehr unterliegt seit der Einführung in den 1950er Jahren einem kontinuierlichen Wachstum [68]. Im Zeitraum zwischen den Jahren 1996 und 2018 wuchs der jährliche Transportbedarf um durchschnittlich 5,8 %. Es wird erwartet, dass sich der Bedarf an Containertransporten bis in das Jahr 2050 mehr als verdoppeln wird. Im gleichen Zeitraum wird für den gesamten globalen maritimen Handel lediglich eine Wachstumsrate von 40 % prognostiziert. [9]

Der Erfolg der Containerschifffahrt basiert unter anderem auf der Einführung normierter Transportbehälter. Hierdurch wird die Beladung unterschiedlichster Güterarten ermöglicht und die Transportmethode durch Vereinheitlichung vereinfacht [66]. Das Transportgut kann problemlos im Schienen- oder Straßenverkehr weiter transportiert werden. Die Waren bleiben bis zur Ankunft beim Empfänger unberührt, was einen Sicherheits- und Komfortgewinn bedeutet. Durch die Einführung des Containers wurde ein kontinuierliches Größenwachstum der Schiffe ermöglicht. Durch die immer größer werdenden Schiffe konnte eine Senkung der Transportkosten ermöglicht werden, was auf die *economies of scale* zurückzuführen ist. [69]

In der globalen Containerschifffahrt kam es durch Bildung von Allianzen einzelner Reedereien, zu einer Oligopolisierung dieses Bereiches des Transportsektors. Das Bestreben eines Zusammenschlusses von Reedereien zu kooperierenden Partnern kann durch einige Gründe dargelegt werden. Im Gegensatz zu einem allein agierenden Einzelunternehmen können ohne

Investitionen in eigene Schiffskapazitäten neue Märkte erschlossen und größere Reichweiten angeboten werden. Es besteht die Möglichkeit den globalen Schiffseinsatz gemeinschaftlich zu planen und zu optimieren, um die Auslastungsraten zu erhöhen. Durch die kombinierte Marktmacht können Preisvorteile beim Kauf von Umschlagsleistung, Hinterland-Transport und Zulieferer- und Verteilschiffen erreicht werden. Zudem können Investitionen sowie Risiken auf alle Mitglieder verteilt werden. Durch diesen anhaltenden Trend haben sich mittlerweile drei dominierende Allianzen gebildet. Die globale Containerkapazität von 22 Mio. TEU verteilt sich, wie in Abbildung 7 dargestellt, weitestgehend unter den drei Konsortien auf. [70] Das *M2-Konsortium*, bestehend aus der *Maersk Line* und der *Mediterranean Shipping Company (MSC)*, ist ein Zusammenschluss der zwei weltweit größten Reedereien. Die in Europa ansässigen Firmen besitzen mit 36 % der globalen Gesamtkapazität die größte Anzahl an abrufbereiten Containern. Die *Ocean Alliance* besitzt einen Anteil von 33 % und setzt sich aus den Einzelmitgliedern *Evergreen Line*, *CMA CGM*, *COSCO Container Lines* und *Orient Overseas Container Line (OOCL)*, zusammen. Die *Transport High Efficiency Alliance (THE Alliance)* wurde im Jahr 2017 gegründet und gilt als neuestes Konsortium. Die Mitglieder bestehen aus den Unternehmen *ONE*, *Yang Ming* sowie *Hapag-Lloyd*, welche eine globale Kapazitätsvereinigung von 18 % vorweisen. Hinter dem Name *Ocean Network Express (ONE)* steht ein Zusammenschluss aus den drei großen Reedereien *NYK Line*, *MOL* und *“K” Line*. [71]

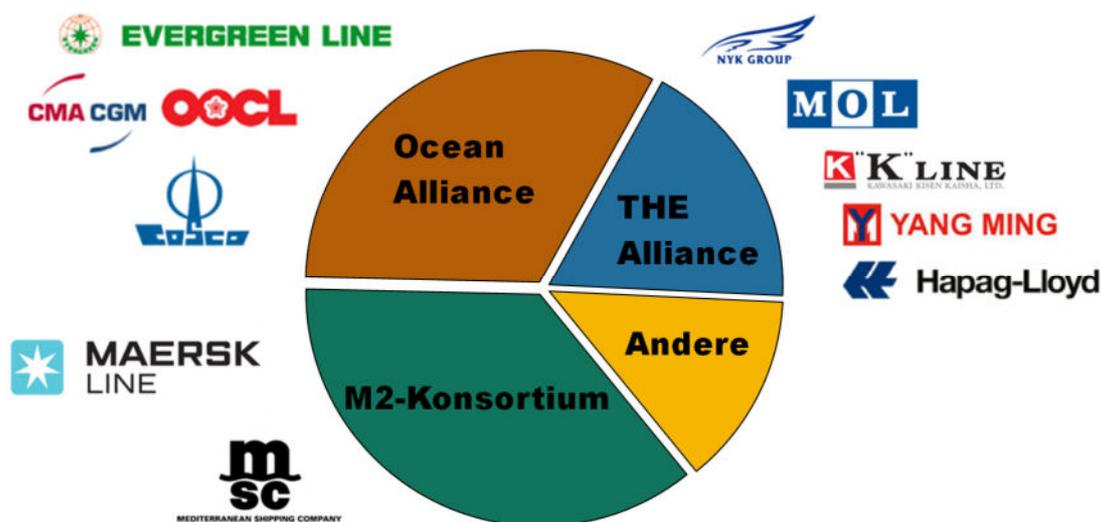


Abbildung 7 – Globale TEU-Kapazitäten der Konsortien, eigene Darstellung auf Basis von [71] mit Firmenlogos von [72]

2.3.3 Emissionsregularien in der Containerschifffahrt

Dieses Unterkapitel fasst die derzeit geltenden und geplanten Emissionsrichtlinien für Schwefel, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Partikel in der Seeschifffahrt zusammen.

Um die **Schwefelemissionen** aus der Schifffahrt zu begrenzen, wurde 1973 ein internationales Übereinkommen auf Grenzwerte getroffen. In der *International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships* sowie den daraus folgenden *MARPOL-Protokoll* wurde die stufenweise Reduzierung des Schwefelgehalts im Kraftstoff festgelegt [73]. Seit Anfang 2020 gilt demnach ein Maximalwert von 0,5 % Schwefel im Schiffskraftstoff. Zudem wurden in der Nord- und Ostsee sowie an der nordamerikanischen Küste zusätzlich *Sulphur-Emission-Control-Areas* (SECA), für Schiffsdieselmotoren eingerichtet [74]. Die Grenzwerte für diese Bereiche sind auf 0,1 % Schwefel im Kraftstoff festgelegt. Zum Vergleich liegt der erlaubte Schwefelgehalt in Dieselmotoren für den KFZ-Straßenverkehr in der EU bei 0,001 %.

Die **Partikelemissionen** werden derzeit ausschließlich indirekt über die Vorgaben zu den Schwefelemissionen begrenzt. Das ist darauf zurückzuführen, dass diese derzeit einen Hauptanteil der ausgestoßenen Partikel darstellen. Des Weiteren sind für die Partikelemissionen Regelungen vorgesehen, welche den sichtbaren Rauch von Frachtschiffen limitieren. [75]

Für Motoren, die ab dem Jahr 2011 konstruiert werden, gilt laut dem internationalen Abkommen MARPOL eine **NO_x**-Emissionsminderung um 20 % im Vergleich zur IMO Tier-I-Norm. Des Weiteren sind in den NO_x-Emission-Control-Areas (NECA), vor der nordamerikanischen Küste für Neubauten ab 2016 der IMO Tier-III-Standard mit einer Emissionsminderung von 80 Prozent im Vergleich zu IMO Tier I-Modellen beschlossen. Ab 2021 gelten die strengeren IMO Tier-III-Vorschriften für Neubauten ebenfalls für die NECA der Nord- und Ostsee. [75]

Um die **CO₂-Emissionen** zukünftig zu senken, wurde am 1. Januar 2018 die Erfassung und Berichterstattung der jährlichen Treibhausgasemissionen für Schiffe über 5.000 Bruttotonnen auf Fahrten von oder zu europäischen Häfen beschlossen [76]. Die IMO hat die erste Treibhausgassenkungsstrategie für die internationale Schifffahrt in einem internen Ausschuss angenommen. Diese sieht eine Halbierung der gesamten CO₂-Emissionen im Seeschiffsverkehr bis 2050 gegenüber 2008 vor. Im Durchschnitt soll eine Minderung pro Transportleistung bis 2030 um 40 Prozent und bis 2050 um 70 Prozent gegenüber 2008 erreicht werden. Weiterhin ist vorgesehen, Schiffe nach einem Energieeffizienz-Design-Index zu bewerten. Die Ausarbeitung des vorgesehen detaillierten Maßnahmenpakets dauert noch an. [75]

Das Europäische Parlament hat sich 2017 explizit für die Einbeziehung des Schiffsverkehrs in den europäischen Emissionshandel (EU-ETS) ab 2023 ausgesprochen [77]. Für ähnliche

Forderungen wirbt derzeit ebenfalls das Bundesumweltministerium. Derzeit liegen jedoch noch keine Beschlüsse für politische Anreizsysteme zur CO₂-Minderung vor und der Industrie fehlen kommerzielle Konzepte und Geschäftsmodelle die eine merkliche Minderung oder gar CO₂-neutrale Seeschifffahrt vorantreiben. [78]

2.3.4 Emissionsminderungsstrategien der Containerschifffahrt

In diesem Abschnitt werden einige Konzepte zur Dekarbonisierung der Containerschifffahrt erklärt. Hierunter fallen Technologieoptionen, welche als Ausgangsenergiequelle die regenerativen Energien verwenden, um einen gasförmigen oder flüssigen Kraftstoff zu gewinnen und diesen auf den Containerschiffen zur Fortbewegung einzusetzen. Dekarbonisierungskonzepte können durch innovative Verbesserungsmaßnahmen, beispielsweise strömungsoptimierte Schiffsrümpfe oder Verbesserungen des Wirkungsgrads bei der mechanischen Kraftübertragung des Antriebspropellers, unterstützt werden [79]. Ohne eine konsequente Umstellung auf andere Technologien können die Minderungsziele des Jahres 2050 nicht erreicht werden.

Die Auswahl geeigneter Konzepte zur Dekarbonisierung der Containerschifffahrt muss anhand verschiedener Gesichtspunkte getroffen werden. Neben technischen Eigenschaften wie der Gesamtwirkungsgrad aus Energiewandlung und Speicherung sowie der Kraftstoffenergiedichte müssen auch wirtschaftliche Aspekte durch die verschiedenen eingesetzten Techniken in Betracht gezogen werden [67, 80, 81]. Zusätzlich sind inhärente Herausforderungen durch das gewählte Konzept, wie beispielsweise die Toxizität, hohe Speicherdrücke der Kraftstoffe oder anlagenspezifische Umsetzbarkeitsgrenzen relevant für die Wahl des Konzeptes. Ziel ist es, ein möglichst nachhaltiges und sicheres Konzept bei gleichzeitig minimalen Kosten zu finden. Um die Komplexität der Abwägung für die Einsatzfähigkeit eines regenerativen Kraftstoffes nachzuvollziehen, werden durch die Energiedichte und anhand von ausgewählten Kriterien Treibstoffe miteinander verglichen. Die Bewertung soll verdeutlichen, dass es eine Herausforderung bei der Abwägung von verschiedenen nicht im Zusammenhang stehenden Kriterien besteht.

Die Energiedichte eines Kraftstoffes hat einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Seefrachtschiffe. Schiffe müssen in der Lage sein, große Mengen an Gütern über weite Distanzen zu transportieren. Die aufzuwendende Energie für die Fahrt muss in Form von chemischer Energie in Kraftstofftanks mitgeführt werden. Um eine Vorstellung für die Dimensionierung der benötigten Kraftstoffmengen zu erhalten, wird eine kurze Vergleichsrechnung durchgeführt. Ein modernes Containerschiff mit einer Ladekapazität von über 10.000 TEU kann in voller Fahrt pro Tag mehrere hundert Tonnen MDO verbrauchen. Für

die Route *Shanghai-Rotterdam* mit einer Streckenlänge von 21.000 km und einer für den Frachtverkehr üblichen Durchschnittsgeschwindigkeit von 19,6 km/h, benötigt das Containerschiff *Emma Maersk* etwa 3.200 t MDO [82]. Dies erscheint bei der Betrachtung einer Tragfähigkeit von 156.907 DWT und einem sich daraus ergebenden massenbezogenen Anteil von circa 2 % eine zu vernachlässigende Größe zu sein. Die Einheit DWT bezeichnet die Gesamt-Tragfähigkeit eines Handelsschiffes. Diese errechnet sich aus der Differenz der Wasserverdrängung bis zur maximal zulässigen Lademarke eines beladenen Schiffes und dem eines ungeladenen Schiffes. Jedoch wird dieser Einflussfaktor bei veränderten Speicherdichten der Treibstoffe zunehmend relevanter, da bei entsprechenden Lagerbedarfen die Lastmitnahme des jeweiligen Schiffes verringert wird. Neben der Minderung des möglichen Transportierbaren steigt bei Energieträgern mit geringer volumetrischer Energiedichte der Platzbedarf für die Lagerung an Bord. In Abbildung 8 werden Energieträger anhand der massen- sowie volumenbezogenen Energiedichte dargestellt.

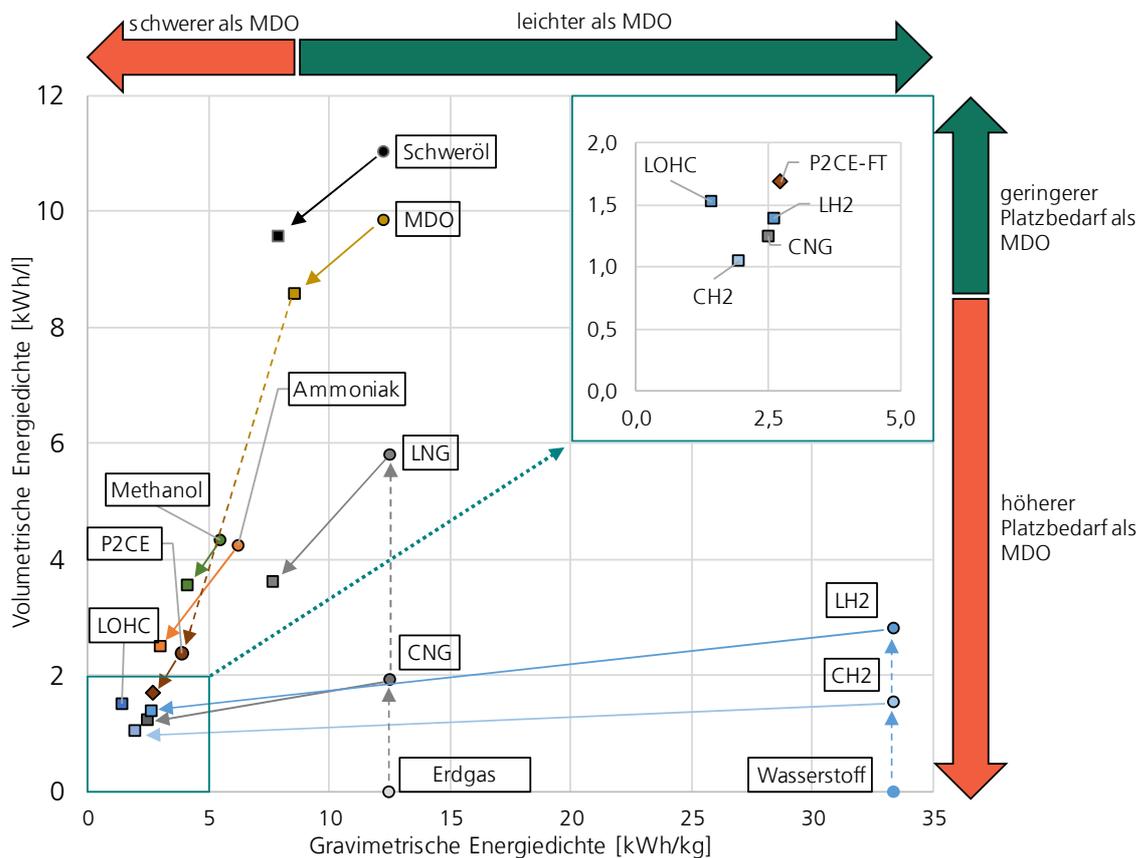


Abbildung 8 – Energiedichten diskutierter Treibstoffe, Kreise kennzeichnen natürliche physikalische Eigenschaften, Vierecke berücksichtigen zusätzlich die Speichereinheit, eigene Darstellung auf Basis von [80, 81, 83]

Die Y-Achse kennzeichnet die volumetrische Energiedichte, welche als chemisch gebundene Energiemenge in Kilowattstunden je Liter Treibstoff angegeben ist. Auf der X-Achse wird die gravimetrische Dichte dargestellt. Diese beziffert die Energiemenge in Kilowattstunden pro Kilogramm des zu betrachtenden Stoffes. Wenn die gravimetrische Dichte eines Stoffes größer

ist, wird weniger Traglast für die Lagerung an Bord benötigt. Analog muss bei einem Treibstoff mit einer höheren volumetrischen Dichte weniger Raum für den Treibstoff aufgewendet werden. Ein Kreis verweist auf die physikalischen Eigenschaften des Ausgangsstoffes unter Normalbedingungen. Die Speicherdichten inklusive der entsprechenden Tanksysteme werden durch ein Viereck dargestellt. Der konventionelle Treibstoff Marinediesel ist in Gelb eingezeichnet und weist die gleichen physikalischen Eigenschaften wie der Kraftstoff aus Fischer-Tropsch-Synthese auf. Die deutliche Absetzung zu den anderen Kraftstoffen bezeugt die vergleichsweise hohe Energiedichte von flüssigen Kohlenwasserstoffen.

Wasserstoff kann eine verhältnismäßig hohe massenbezogene Energiedichte vorweisen. Mit einem Heizwert von 33,33 kWh/kg H₂ entspricht diese in etwa dem dreifachen von Marinediesel. Im Gegensatz dazu steht die geringe volumenbezogene enthaltene Energiemenge von 0,003 kWh/l unter Normalbedingungen. Durch Komprimierung, dargestellt als CH₂, oder Verflüssigung des Wasserstoffs, dargestellt als LH₂, kann die Speicherdichte erhöht werden, jedoch steigt unter Berücksichtigung der Tanksysteme die Gesamtmasse sowie der Platzbedarf an Bord gravierend. Dies liegt an der Tatsache, dass die Wasserstofftanks extreme Lagerbedingungen ermöglichen müssen. Wasserstoff wird bei -252 °C flüssig bzw. bei einem Druck von 700 bar gasförmig gelagert. Die Isolation sowie das Materialaufkommen für stabile oder gegebenenfalls gestapelte Tanks sind daher der Grund für die geringere Energiedichte unter Berücksichtigung des Speichersystems. Ähnlich, aber weniger bedeutend, zeichnet sich diese Problematik bei den anderen Flüssiggas-Kraftstoffen Methan und Ammoniak ab. Die Speicherdichten werden durch den Lageraufwand im Gegensatz zu den bloßen komprimierten Ausgangsstoffen im Verhältnis stark reduziert. Drucklos gelagerte Flüssigkraftstoffe wie Methanol, Marinediesel und FT-Kraftstoff können hingegen eine verhältnismäßig kleine Vergrößerung der Lagerbedarfe vorweisen. In Tabelle 2 werden fünf verschiedene Kraftstoffe nach Kosten sowie dem Entwicklungsstand bewertet. Es ist zu erkennen, dass alle Treibstoffe Vor- und Nachteile aufweisen.

Tabelle 2 – Bewertungskriterien verschiedener regenerativer Kraftstoffe

Regenerative Kraftstoffe	Bewertungskriterien					sonstiges[31]
	Kosten Treibstoff [6]	Kosten Speicherung [6]	Kosten Antrieb [6]	Entwicklungsstand [31] Produktion Verwendung		
Wasserstoff (lq.)						
Methan						
FT-Kraftstoff						
Methanol						
Ammoniak	*	**				
	hoch	>0,5 €/kWh	>900 €/kW	Entwicklungsphase TRL <5		Toxizität
	mittel	0,15-0,5 €/kWh	500-900 €/kW	Erster Indust. Einsatz TRL<9		k.A.
	gering	<0,15 €/kWh	<500 €/kW	Verbreiteter Einsatz TRL=9		drop-in

*eigene Berechnungen auf Basis von [84–86]

**eigene Berechnungen auf Basis von [6]

2.3.5 Das Power-to-Cycle-Engine-Konzept

Im Jahr 2018 wurde am *Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik*, kurz *Fraunhofer IEE*, ein Dekarbonisierungskonzept für die Containerschifffahrt entwickelt. Das Power-to-Cycle-Engine-Konzept (P2CE-Konzept), sieht die Verwendung von synthetisch hergestellten Kohlenwasserstoffen als Treibstoff sowie eine effiziente CO₂-Abscheidung an Bord des Schiffes vor. Das so gewonnene CO₂ kann in einem zweiten Teilsystem zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wiederverwendet werden. Dadurch entfällt die zur Erzeugung der Kohlenwasserstoffe notwendige CO₂-Quelle. Eine Untersuchung des Systems sowie die Betrachtung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurde in einer institutsinternen Studie durchgeführt.

2.3.5.1 Funktionsprinzip

Um eine vereinfachte Abtrennung des Kohlenstoffdioxids aus dem Abgas des Schiffsantriebs zu gewährleisten, wird dieser mit dem Oxyfuel-Verfahren betrieben. Bei diesem Verfahren wird neben einem synthetischen Kraftstoff reiner Sauerstoff für die Verbrennung verwendet. Während der Verbrennung im Oxyfuel-Betrieb anfallendes Rauchgas besteht weitestgehend aus Wasserdampf sowie Kohlenstoffdioxid. Der Abgasstrom wird heruntergekühlt um das Wasser durch Auskondensierung abzutrennen.

Für die Abspeicherung wird das CO₂ komprimiert und anschließend verflüssigt, um eine Speichermaximierung an Bord zu gewährleisten. Die Arbeit für die Komprimierung kann durch Erhitzung und anschließend freiwerdende Expansionsarbeit des gleichzeitig für die Verbrennung benötigten tiefkalten Sauerstoffes gedeckt werden. Der Sauerstoff wird hierzu mit der im Abgas enthaltenen Wärme überhitzt. Um das CO₂ in eine flüssige Phase zu überführen, wird es zunächst in einen thermodynamisch günstigen komprimierten Zustand versetzt. Anschließend wird es über einen Phasentauscher geleitet, wobei die abzuführende Wärme für den Phasenübergang, durch die Verdampfungsenthalpie des kryogenen Sauerstoffes aufgenommen wird. Zusätzlich ist durch die äquivalente Ab- und Zufuhr von O₂, bzw. CO₂ eine bivalente Nutzung der benötigten Flüssiggastanks denkbar.

Um für den Verbrennungsprozess an Bord Kraftstoff sowie Sauerstoff bereitzustellen, ist eine landseitige Produktion vorgesehen. Bei der Elektrolyse werden Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt. Wasserstoff wird verwendet um synthetische Kohlenwasserstoffe herzustellen. Der Sauerstoff wird aufgefangen und verflüssigt, in Tanks auf dem Containerschiff mitgeführt und für die Verbrennung mit dem Oxyfuel-Verfahren verwendet. Um den Sauerstoff zu

verflüssigen, wird analog zur Verflüssigung an Bord, die Verdampfungsenthalpie, welche beim Ausspeichern des CO₂ entsteht, verwendet. In Abbildung 9 wird schematisch das P2CE-Konzept dargestellt, welches sich in einen land- bzw. produktionseitigen sowie einen verbrennungs- bzw. schiffsseitigen-Prozess aufteilt. Der Kopplungspunkt, dargestellt als Lieferkette, kennzeichnet das Beladen eines Schiffs mit Treibstoff sowie der Austausch des flüssigen Sauerstoffs und Kohlenstoffdioxids. Diese werden fortan als Begleitgase bezeichnet. In Abbildung 8 ist die Energiedichte des P2CE-Kraftstoffs unter Berücksichtigung der Begleitgase in Orange dargestellt. Hierbei wird für die physische Bilanzierung die zusätzliche Lagereinrichtung mitbetrachtet.

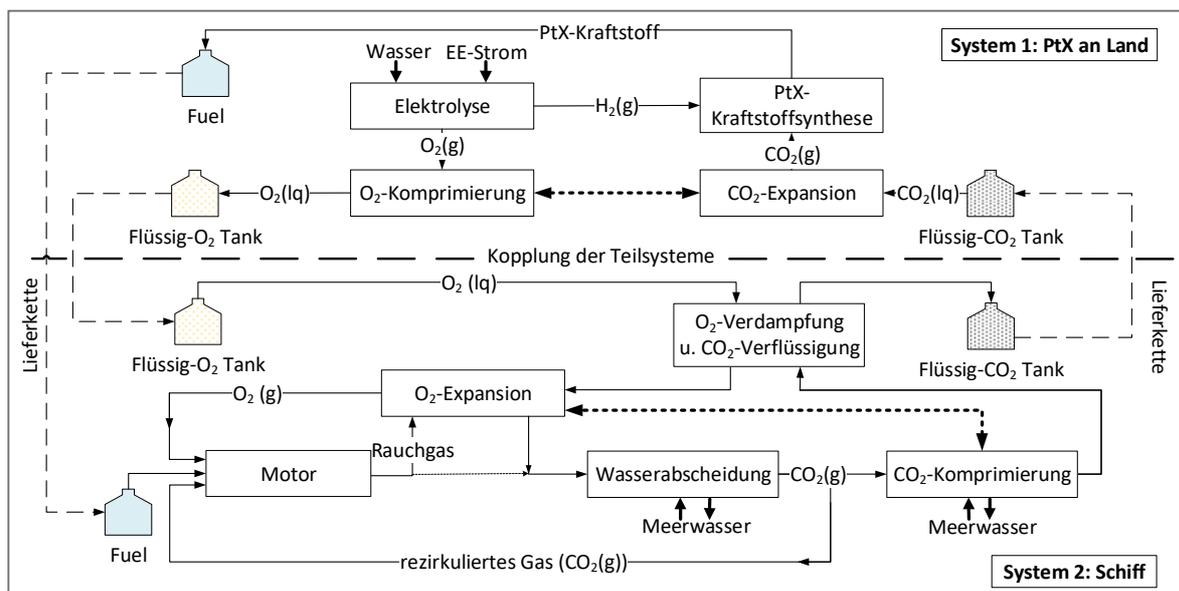


Abbildung 9 – P2CE-Konzept, eigene Darstellung

2.3.5.2 Stand der Technik

Für eine Machbarkeitsuntersuchung wurde eine Simulation durch die Software ASPEN PLUS durchgeführt. Hierzu wurde der Prozess durch softwareeigene mathematische-physikalische Modelle sowie selber entwickelte Annahmen, in die Simulationsumgebung als ein theoretisches Abbild überführt. Durch die Simulation konnten erste Erkenntnisse zum stationären Verhalten des Konzepts gewonnen sowie die eigenhändig errechneten thermodynamischen Größen, mit Fokus auf den Wärmetauschern und den Turbomaschinen, bestätigt werden. Da es sich bei der Simulation um einen ersten Schritt in der Entwicklung eines neuartigen Motorkonzepts handelt, unterliegen die Ergebnisse sowie die Auswahl der Komponenten einer gewissen Unsicherheit. In einer institutsinternen Betrachtung wird dem Konzept aufgrund des noch frühen Entwicklungsstadiums, ein *technology readiness level* (TRL) von 2 zugesprochen.

2.3.5.3 Einbettung in PtL-Wirtschaft

Die Seeschifffahrt ermöglicht den Handel zwischen räumlich weit getrennten Volkswirtschaften. Die Verbindungsrouten verlaufen oft entlang strahlungs- bzw. windreichen Regionen. Im Jahr 2018 wurde etwa ein Viertel der globalen, in Containern transportierten Waren, auf der Route zwischen Asien und Europa verschifft [67]. Die Transportschiffe queren auf dieser Route unter anderem das Mittelmeer, das Rote Meer, den Golf von Aden sowie das Arabische Meer bzw. den indischen Ozean. Treibstoffe sowie deren Begleitgase können direkt an den küstennahen PtL-Synthesestätten getrennt von Warenumschlagpunkten über Terminals bereitgestellt werden. In einem alternativen Umsetzungskonzept kann die Infrastruktur auf küstennahen, künstlich aufgeschütteten Inseln bereitgestellt werden. In Abbildung 10 ist das Konzept der Refuel-Island grafisch dargestellt. Vorteil dieses Konzepts ist demnach, dass die Abnahme des Produktes sowie Belieferung des Edukts direkt am Kraftstoffproduktionsstandort stattfindet. Hierdurch entfallen aufwendige Lieferungen zwischen den Betankungspunkten an Häfen und den Produktionsstätten. Die Lagertanks der Begleitgase können, unabhängig vom Erscheinungsbild der Küste, möglichst nah an dem zu beliefernden Schiff platziert werden. So kann der Aufwand, durch das Herunterkühlen der Flüssiggasleitungen, begrenzt werden. Des Weiteren muss bei der Standortwahl der Betankungspunkte und folglich auch der PtX-Synthesestätte, nur bedingt auf die Meerestiefe in unmittelbarer Küstennähe geachtet werden. Da bei dem P2CE-Verfahren für die Kraftstoffproduktion der Abnehmer ebenfalls die CO₂-Quelle darstellt, bedarf es neben regulatorischen auch technische Voraussetzungen für die Umsetzung.

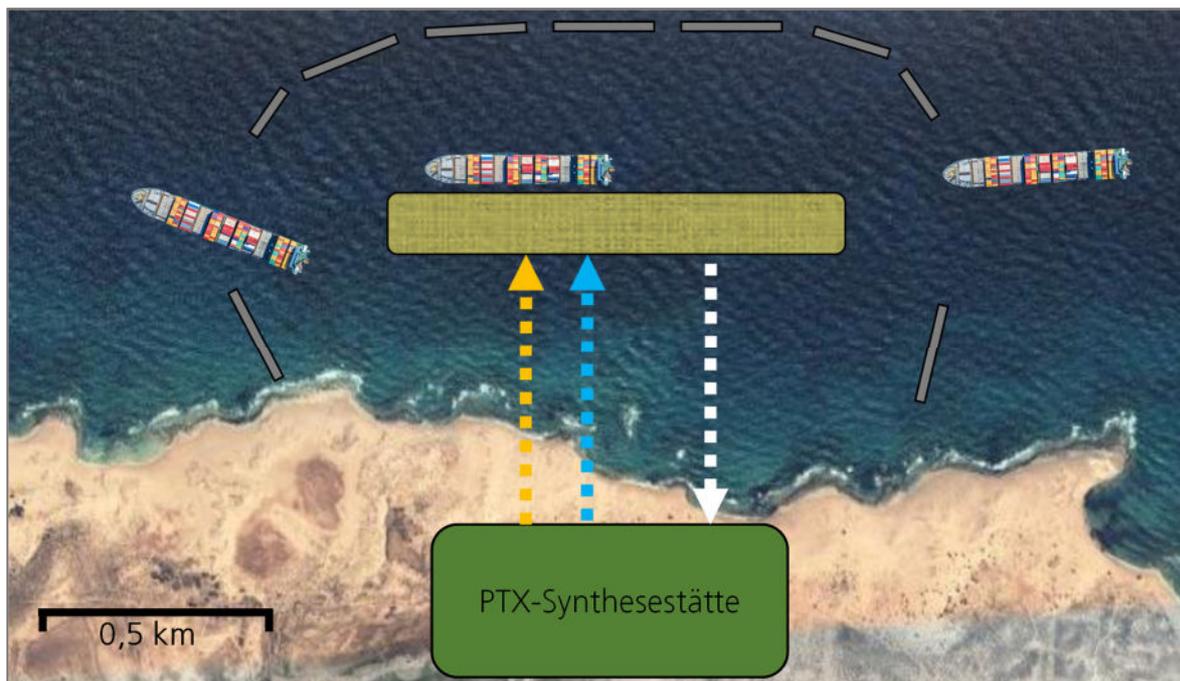


Abbildung 10 – Konzept Refuel-Island, eigene Darstellung mit Kartenausschnitt auf Basis von [87]

3 Methodik

In diesem Kapitel werden Berechnungsansätze für die Identifikation von Kraftstoffproduktionskosten sowie die Bedarfe für den Flug- und Schiffssektor beschrieben. Für die Bedarfsdeckung durch den drop-in fähigen Fischer-Tropsch-Kraftstoff wird sich lediglich auf die Berechnung der Kraftstoffkosten bezogen. Es wird demnach keine Umstellung der Antriebstechniken betrachtet. Die Berechnung der Kosten beziehen sich auf das Jahr 2030. Hierbei werden besonders die Teilkosten der CO₂-Bereitstellung betrachtet. Für die Bedarfsrechnung wird vorab auf die unterschiedlichen Gegebenheiten innerhalb des jeweiligen Sektors eingegangen. Die Berechnungen erfolgen auf Basis von historischen Daten, welche in ihrem Dargebot sowie vorhandener Qualität beschrieben und bewertet werden. Zusätzliche Rahmenbedingungen werden festgelegt und die angewandten Methoden beschrieben. Weiterführend wird für die Containerschifffahrt eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

3.1 Kosten der regenerativen Kraftstoffproduktion

Um die errechneten Kraftstoffbedarfe mit regenerativ hergestellten Kraftstoffen zu decken, werden in diesem Kapitel vorab Annahmen zum technischen und wirtschaftlichen Betrieb von Synthesestätten dargelegt. Anschließend wird ausgehend von standortabhängigen erneuerbaren Ressourcen eine Auslegung der in Zusammenhang stehenden, Einzelkomponenten durch eine Kostenoptimierung beschrieben. Die Kostenrechnung bezieht sich auf die in Kapitel 3.3 ausgewählten Standorte.

Für die Berechnung der standortabhängigen Kosten der Treibstoffe wird auf ein Berechnungsmodell des Fraunhofer IEE zurückgegriffen. Da Ergebnisse aus dieser Methodik als Inputwerte einen direkten Einfluss auf weiterführende Rechnungen nehmen, wird ebenfalls auf die nicht selbst entwickelte Potentialanalyse sowie die Kraftwerksoptimierung eingegangen.

3.1.1 Datengrundlage und verwendete Bestandsmodelle

Als **Datengrundlage** für die Modellierung der Kraftstoffgestehungskosten wurden aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Projekt DeVKopSys verwendet. In dem Forschungsprojekt wurde zur Identifikation möglicher PtX-Produktionsstätten eine globale Flächenpotentialanalyse durchgeführt. Da die Nutzung von Flächen zur PtX-Erzeugung durch zahlreiche Faktoren eingeschränkt ist werden im ersten Schritt, die nicht nutzbaren Gebiete qualitativ von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Mittels boolescher Überlagerung werden

Ausschluss- und Abstandskriterien auf verschiedenen Flächenkategorien angewendet. Eine Zusammenfassung des unterstellten Kriterienkatalogs kann im Anhang A eingesehen werden.

Als Kriterium für nutzbare Standorte wurden die Stromgestehungskosten für PV- und Windkraftanlagen für verschiedene Länder verwendet. Ausgehend von Daten des „*Global Solar Atlas 2.0*“ sowie dem „*Global Wind Atlas 3.0*“ wurden unter der Annahme von Beispielanlagen in einem internen Modell ökonomische Richtwerte erzeugt [88, 89]. Mit Kostenobergrenzen für das Jahr 2050 von levelized cost of electricity (LCOE) von 30 €/MWh für PV-Anlagen und 40 €/MWh für die Windkraft wurden isolierte Flächen für die weiterführende Betrachtung ausgewählt. In Abbildung 11 werden alle global identifizierten Potentialflächen in Grün abgebildet. [90]

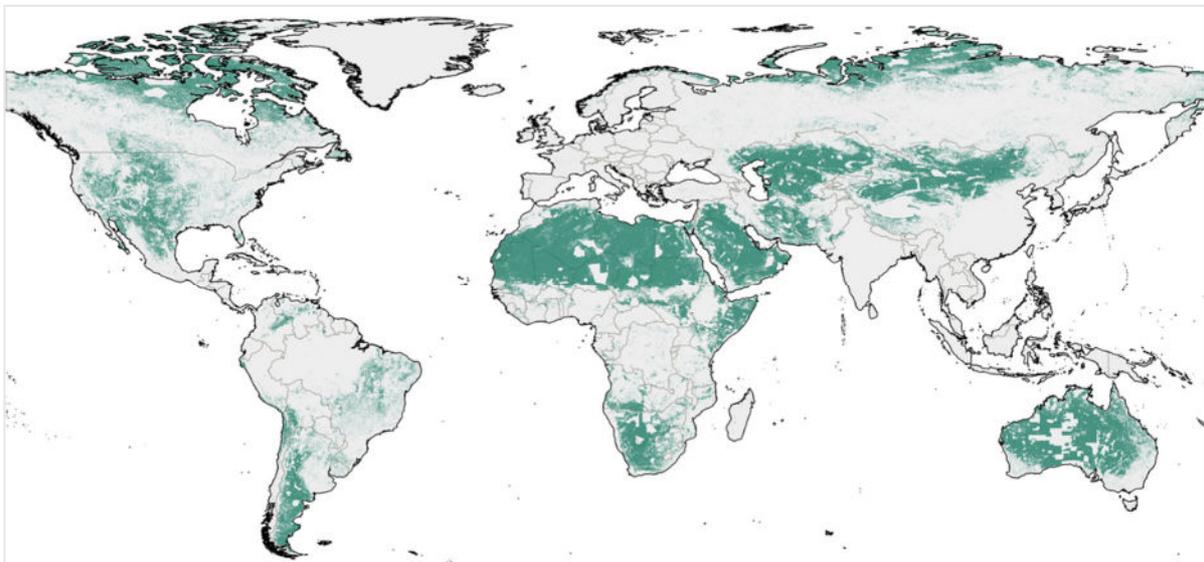


Abbildung 11 – Vorrangflächen für die Produktion von regenerativen Kraftstoff, eigene Darstellung auf Basis von [90]

Zur Abbildung der Kraftstofferzeugung aus Erneuerbaren Energien werden zeitlich hochaufgelöste Erzeugungszeitreihen für Freiflächenanlagen und Onshore-Windenergieanlagen am Standort simuliert. Die Zeitreihenmodellierung erfolgte mit den am Fraunhofer IEE entwickelten physikalischen Wind- bzw. PV-Modellen unter Verwendung von Wetterinformationen aus dem Wettermodell ERA5 des ECMWF. [91]

Für die Auslegung der Kraftwerkskomponenten wurde am *Fraunhofer IEE* im Rahmen des Projektes *DeVKopSys* eine Erweiterung des Energiesystemmodell *SCOPE* entwickelt. Anhand einer kostenoptimalen Systemauslegung mit *SCOPE* können an den identifizierten Vorzugsstandorten die Kraftstoffgestehungskosten abgeschätzt werden. Dieses Optimierungsmodell verfolgt in der Zielfunktion eine Minimierung der Kraftwerkskosten. Methodisch wird hierzu eine stundengenaue, lineare, deterministische Optimierung

durchgeführt. Die Modellierung betrachtet unterschiedliche Systemkomponenten. Neben dem Einsatz von Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung besteht die Möglichkeit verschiedene Speichersysteme (elektrisch, thermisch, chemisch) zu modellieren. Zudem wird eine kostenoptimale Auslegung der PtX-Teilsysteme wie Elektrolyse, Synthese oder die DAC-Technologie modelliert. Für die Berechnung werden dem Modell technische Spezifikationen sowie Kostenannahmen der einzelnen Anlagenkomponenten übergeben. Als Ergebnis liefert das Modell die Kraftstoffgestehungskosten in Euro je Terrawattstunde Kraftstoff, die Auslegungszusammensetzung der Einzelkomponenten sowie eine Abbildung des Anlagenbetriebs in stündlicher Auflösung. [92]

3.1.2 Kostenparameter

In diesem Abschnitt werden die Annahmen zu den Kosten für die einzelnen Komponenten einer PtX-Synthesstätte sowie zu Infrastruktur- und Lieferkosten definiert. Neben der Stromerzeugung, den Elektrolyse- und Syntheseanlagen werden für die Kraftstoffproduktion Wärme-, Strom- und Wasserstoffspeicher, Wärmeerzeuger sowie eine CO₂-Bereistellungsanlage benötigt. Des Weiteren wird für die Verschiffung von Treibstoff an definierte Bezugshäfen die Kosten für Übertragungsnetze definiert. Im Folgenden werden ausschließlich die betriebswirtschaftlichen Annahmen zu den einzelnen Technologien dargestellt. Als Stromerzeugung werden Windkraft- und Photovoltaikanlagen genutzt. In Tabelle 3 werden die betriebswirtschaftlichen Annahmen dieser beiden Technologien dargestellt. Die Nabenhöhe der Windkraftanlagen beträgt 180 m und der Rotordurchmesser 182 m. Die Kosten der Photovoltaikanlage bilden den finanziellen Aufwand für das komplette System bestehend aus PV-Modulen, Wechselrichter, Verkabelung und Aufständigung ab. [90]

Tabelle 3 – Angenommenen Kosten der Stromerzeuger [93, 94]

Stromerzeuger	CAPEX	OPEX	Abschreibung
Windkraftanlagen	1.052 €/kW	4 % von CAPEX	20 a
Photovoltaikanlagen	435 €/kW	2,5 % von CAPEX	22 a

In Tabelle 4 sind die angenommenen Kosten für die Elektrolyse- und Syntheseanlagen dargestellt. Die Investitionskosten ergeben sich aus den Gesamtkosten einer Anlage je Produktionsleistung. Dieser Leistungswert ist das Produkt aus Massenstrom des produzierten Gutes und des stoffspezifischen Heizwertes.

Methodik

Tabelle 4 – Kostenannahmen der Elektrolyse- und Syntheseanlage

Stoffwandlung	CAPEX	OPEX	Wirkungsgrad	Abschreibung
PEM-Elektrolyse*	740 €/kW _{H₂}	2,5 % von CAPEX	65 %	20 a
FT-Synthese**	449 €/kW _{FT}	1 % von CAPEX	59 %	20 a

*Eigene Annahmen auf Basis von [95]

**Eigene Annahmen auf Basis von [96]

Um Kohlenstoff für die PtL-Produktion bereitzustellen, wird in unterschiedlichen Szenarien von einer Deckung durch DAC-Anlagen ausgegangen. In Tabelle 5 werden zwei unterschiedliche Kostenannahmen dargestellt.

Tabelle 5 – Kostenannahmen der Direct-Air-Capture-Anlagen

DAC-Anlagen	CAPEX	Strombedarf	Wärmebedarf	Abschreibung
Szenario „low cost“ [53]	338 €/t _{CO₂} ·a	225 kWh _{el} /t _{CO₂}	1.500 kWh _{th} /t	25 a
Szenario „high cost“ [97]	1.275 €/t _{CO₂} ·a	700 kWh _{el} /t _{CO₂}	2.200 kWh _{th} /t	25 a

Für die Flexibilisierungsoptionen werden die Kostenparameter in Tabelle 6 dargestellt. Die Investitionskosten für die Wärme- und Wasserstoffspeicher beziehen sich auf gespeicherte Energiemengen, die Batteriespeicher werden mit Kosten je Leistungseinheit veranschlagt.

Tabelle 6 – Kostenannahmen der Flexibilisierungsoptionen

Speichereinheiten	CAPEX	OPEX	Wirkungsgrad	Abschreibung
Wärmespeicher [98]	26 €/kWh _{th}	1 % von CAPEX	-	20 a
Batteriespeicher [98]	479 €/kW _{el}	1 % von CAPEX	-	15 a
Wasserstoffspeicher [99]	25 €/kWh _{H₂}	2,5 % von CAPEX	97 %	20 a

Für den Prozess der CO₂-Abscheidung aus der Luft, muss Prozesswärme bereitgestellt werden. Dieser kann zum einen durch Großwärmepumpen oder durch Elektrodenkessel bereitgestellt werden. Der Elektrodenkessel wandelt mittels eines elektrischen Heizwiderstands Strom in thermische Energie. Die thermische Ausgangsleistung entspricht hierbei maximal dem Energieinput. Wärmepumpen sind in der Lage unter Aufwendung technischer Arbeit, Wärme aus der Umgebung in ein höheres Temperaturniveau zu überführen und somit weitere Exergie aus der Umwelt nutzbar zu machen. Die Leistungszahl spiegelt die durchschnittliche Effizienz wieder. Mit dem in Tabelle 7 angegebenen COP (coefficient of performance) wird das Verhältnis aus erzeugter Wärmeleistung und dem elektrischen Leistungsinput angegeben

Tabelle 7 – Kostenannahmen der Wärmeerzeuger

Wärmeerzeuger	CAPEX	OPEX	Effizienz	Abschreibung
Großwärmepumpen [95]	965 €/kW _{H₂}	1,45 % von CAPEX	2,7 COP	20 a
Elektrodenkessel [98]	300 €/kW _{el}	2,5 % von CAPEX	99 %	20 a

Die Kosten für **Übertragungsnetze** werden für Standorte mit zunehmender Entfernung zur Küste beaufschlagt. Informationen bezüglich der angenommenen Längen der benötigten Übertragungsnetze zu den Kraftstoff-Produktionsstandorten können in Anhang B eingesehen werden. Die spezifischen streckenabhängigen Kosten werden mit 1,4 Mio. € pro km Trasse veranschlagt. [100]

Für **Lieferkosten** der Treibstoffe über den Seeweg wird die Transportkostenberechnung aus Kapitel 3.3.3 verwendet. Um nicht innerhalb der CO₂-Bilanzierung eine Problemverlagerung zu verursachen, wird der Betrieb eines regenerativ betriebenen Transportschiffs angenommen. Dieses verwendet den aufgenommenen Treibstoff ebenfalls für den eigenen Antrieb. Für die spezifischen Transportkosten werden als Ergebnis eine Bandbreite von 6,0-6,3 €/t je 1000km Treibstoff, in Abhängigkeit der Produktionskosten am jeweils angefahrenen Betankungsstandort veranschlagt.

3.1.3 CO₂-Bereitstellung mittels Direct-Air-Capture

Aufgrund der unsicheren Quellenlage bezüglich der spezifischen Eigenschaften der DAC-Technologie sollen in diesem Kapitel wissenschaftliche Veröffentlichungen und Herstellerangaben über die physikalische Adsorptionsfähigkeit sowie Annahmen zur Systemintegration untersucht werden. Die Werte beziehen sich explizit auf die Niedertemperatur-DAC-Anlagen, welche mittels Festbettadsorption CO₂ aus der Umgebungsluft filtern. [53]

Die Kosten einer DAC-Anlage setzen sich aus Betriebs- und Investitionskosten zusammen. Die Betriebskosten hängen vom Wärme- und Strombedarf ab. Die Investitionskosten bemessen sich als Einheit in Euro pro abgetrennter Tonne Kohlenstoffdioxid pro Jahr. Da sich die angegebenen Kosten in Kapitel 3.1.2 auf die im Betrieb befindlichen Anlagen bezieht, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer verminderten Abscheidejahresleistung höhere Investitionskosten entstehen. Unter der Leistungsfähigkeit einer Anlage wird die CO₂-Abscheiderate verstanden, welche pro Jahr aus der Umgebungsluft gefiltert werden kann. Nachfolgend wird ein Modellierungsansatz beschrieben, um die Leistungsfähigkeit von DAC-Anlagen bei unterschiedlichen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen zu quantifizieren.

Wie in 2.1.2.3 beschrieben verläuft der Abscheidungsprozess zyklisch. In einem ersten Schritt wird Umgebungsluft angesaugt und durch Festbettadsorptionsanlagen geleitet, wodurch das Kohlenstoffdioxid an der Oberfläche des Sorptionsmittels gebunden wird. In einem zweiten Schritt wird der Anlagenraum um die Adsorbentien evakuiert um den Anteil von inerten Gasen, wie Stickstoff, während des Abscheidungs Vorgangs zu verringern. Des Weiteren wird durch den Druckabfall das gebundene CO_2 in eine physikalisch günstige Ausgangsbedingung überführt, damit es sich von dem Adsorptionsmittel löst. Dieser Prozess wird durch das Zuführen von Wärme weiter verstärkt. Das Kohlenstoffdioxid wird abgeführt und steht für eine Weiterverarbeitung bereit. [101]

In Abbildung 12 wird die Gleichgewichtskapazität für ein Adsorptionsmittel der Firma *Hydrocell Ltd.* dargestellt. Auf der X-Achse wird die Temperatur der zugeführten Umgebungsluft dargestellt. Die Y-Achse beschreibt die Regenerationstemperatur. Als Graphen werden die von den Prozessbedingungen abhängigen Stoffmengen an CO_2 je Masse Sorptionsmittel und Zyklus dargestellt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich Kennzahlen auf die Leistungsfähigkeit des Adsorbentmaterials bei einer Wärmewechsel-Desorption beziehen [102]. Im Rahmen einer Recherche konnten keine anderen Kennwerte zu DAC-Adsorptionsmaterialien gefunden werden.

Diese abgeschiedene Menge an CO_2 ist kein statischer Wert, sondern ist abhängig von der Temperatur der Umgebungsluft, sowie der Regenerations-Temperatur. In Abbildung 12 wird im linken Teil dieser Zusammenhang für einen CO_2 -Partialdruck von 0,4 mbar dargestellt. In Abbildung 12 wird auf der rechten Seite die Leistungsfähigkeit des Materials bei einer Luftfeuchtigkeit von 2 vol. % H_2O dargestellt. [102]

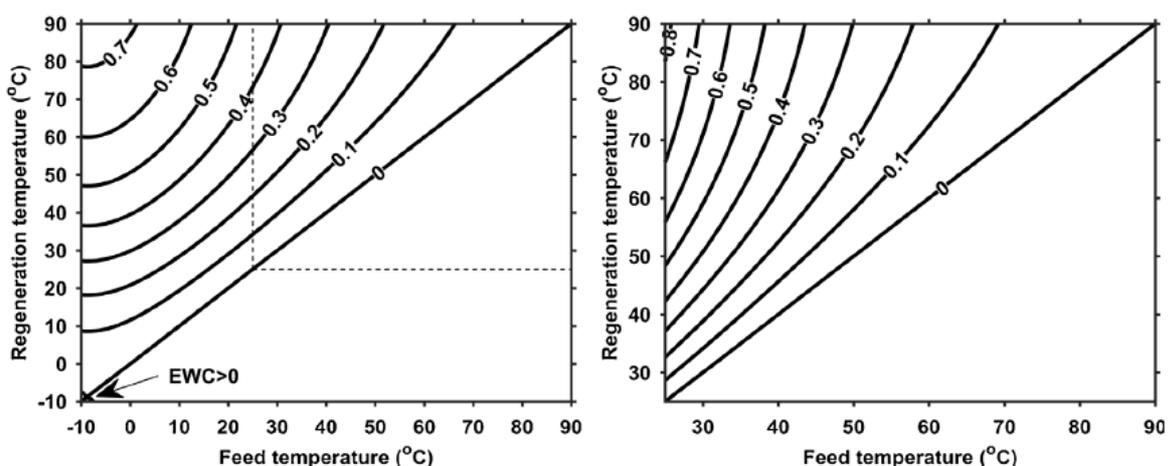


Abbildung 12 – Gleichgewichtskapazität des Adsorptionsmittels ($\text{mmol}_{\text{CO}_2}/\text{g}_{\text{Sorbent}}$) der Firma *Hydrocell Ltd.* bei trockenen Bedingungen (links) und bei einer Luftfeuchtigkeit von 2 vol. % H_2O (rechts) [102]

Wie in der Grafik zu erkennen, lagert das Sorptionsmittel bei niedrigeren Temperaturen mehr Kohlenstoffdioxid an der Oberfläche an. Diese physikalische Eigenschaft wird bei der Regeneration genutzt, indem zum Herauslösen des CO₂ die Temperatur in der Prozesskammer erhöht wird. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass sich das Sorptionsmittel in Abhängigkeit der Temperaturen unterschiedlich stark belädt. Aus diesem Grund steigt die Ausbeute, wenn das Trägermaterial bei einem niedrigen Temperaturniveau beladen wird. Ebenfalls können höhere Ausbeuten mit einer erhöhten Regenerationstemperatur erreicht werden.

Eine weitere Eigenschaft des Materials wird im Vergleich des linken mit dem rechten Teil der Abbildung 12 ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass sich bei einer höheren Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft, eine höhere Beladungsfähigkeit des Adsorbermaterials einstellt. Nachteilig wirkt sich dieser Effekt auf den Energiebedarf der Regeneration aus, da sich das Wasser ebenfalls an der Oberfläche ablagert. Es muss zusätzlich Wärmeenergie für die Abreicherung des Wassers im Adsorbermaterial aufgewendet werden.

Aus den Kennzahlen der Abbildung 12 wurde die Beladung in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit umgerechnet. Die relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis aus tatsächlicher und zu maximal möglicher Beladungsdichte der Luft. Die Lösungsfähigkeit von Wasser in einer Gasphase steigt mit der Temperatur. Aus diesem Grund ändert sich bei gleicher Wassermasse pro Volumeneinheit, die in Prozent angegebene relative Luftfeuchtigkeit mit der Gastemperatur. Hierzu wurden die Beladungswerte in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit linear interpoliert. In Abbildung 13 wird die Beladungsmenge des Adsorbermaterial in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur dargestellt.

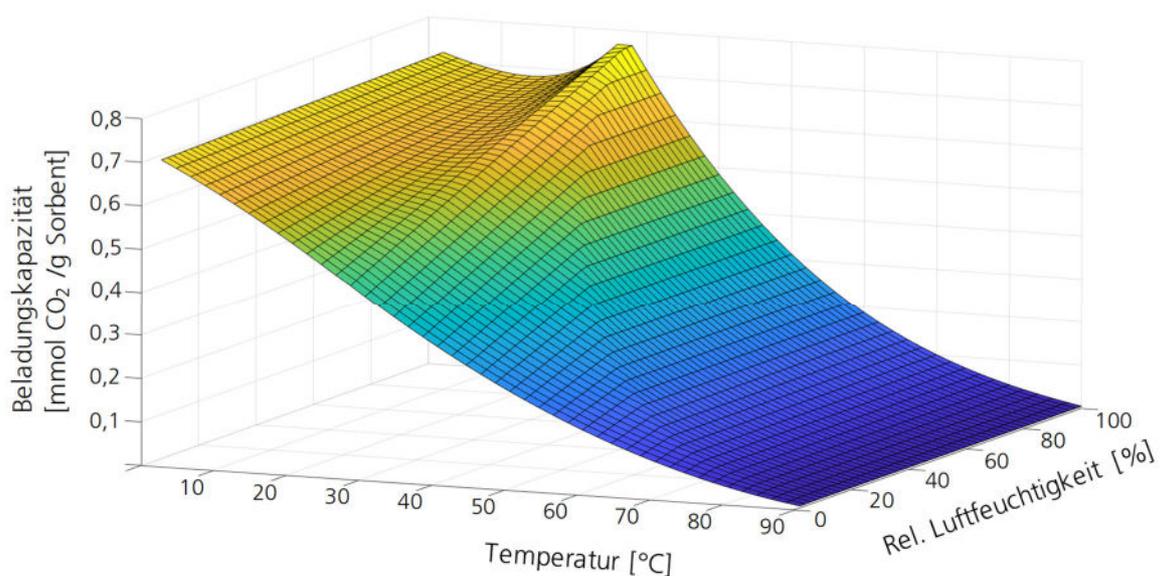


Abbildung 13 – Beladungskapazität des Adsorbermaterials der Firma *Hydrocell Ltd.*, eigene Darstellung

Es ist zu erkennen, dass im Verlauf der Temperaturachse bei 0 % rel. Luftfeuchtigkeit ein abnehmender Trend der Beladungsfähigkeit des Adsorbermaterials vorliegt. Betrachtet man den Temperaturverlauf bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit kann ein Anstieg bis 26 °C beobachtet werden. Dies kann auf die Sättigungsgrenze der Luft zurückgeführt werden. Im Testaufbau wird eine Luftfeuchtigkeit von 2 vol.-%-H₂O angesetzt [102]. Da bei Luft ab einer Temperatur von 26 °C die Sättigungsgrenze erreicht ist, bleibt der Wasseranteil ab diesem Punkt konstant.

Auf Basis von realen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitszeitreihen ist es möglich, einen jährlichen Verlauf der Abscheidungsraten und folglich die Anlagen-Performance für einen beliebigen Standort zu errechnen. Die Firma *Climeworks AG* betreibt eine Pilotanlage am Standort Hinwil, einer Gemeinde des Kantons Zürich in der Schweiz. Um einen Basiswert zu erhalten wird die berechnete Leistungsfähigkeitsermittlung auf die Pilotanlage angewendet. Diese bildet mit einer jährlichen Abscheidungsrate, die Basis für die Errechnung der Investitionskosten in exemplarischen Studien. Die Pilotanlage weist eine Abscheidungsrate von 900 t_{CO₂} pro Jahr auf. Die Anlage ist, wie in Anhang C zu sehen, aus 18 Einzelsegmenten aufgebaut und befindet sich auf dem Dach einer Kehrlichtverbrennungsanlage.

Da die Ausgangsdaten zur Berechnung der Anpassung der Leistungsfähigkeit auf den Daten des Adsorbermaterials der Firma *Hydrocell Ltd.* basieren, können die Ergebnisse nicht auf die Anlagentechnik der Firma *Climeworks AG* übertragen werden. Wird jedoch die Annahme getroffen, dass die Firmen Adsorptionsmittel mit den gleichen Adsorptionseigenschaften und Verfahren verwenden, kann innerhalb der Untersuchung durch Erweiterung der Szenarien eine Sensitivität abgebildet werden.

Der zyklische Betrieb der Anlage teilt sich prozessbedingt in fünf Stunden Adsorption und in eine Stunde Regeneration auf [101]. Folglich werden pro Tag vier Adsorptions-Vorgänge durchlaufen. In Abbildung 14 werden für die Errechnung eines Bezugswerts für die Pilotanlage am Standort Hinwil die Zeitreihen für die relative Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, sowie die errechneten Abscheidungsraten für den Januar 2018 dargestellt. Als Vergleich werden die Werte für einen Beispielstandort in Algerien abgebildet. [90]

Es ist zu erkennen, dass in dem dargestellten Zeitintervall für den Standort Hinwil eine niedrigere Temperatur und gleichzeitig eine höhere relative Luftfeuchtigkeit vorliegen. Da diese zwei Faktoren den DAC-Prozess begünstigen, verläuft der Graph der möglichen Abscheidung pro Masse Sorptionsmittel, auf einem höheren Niveau im Gegensatz zum Vergleichsstandort in Algerien.

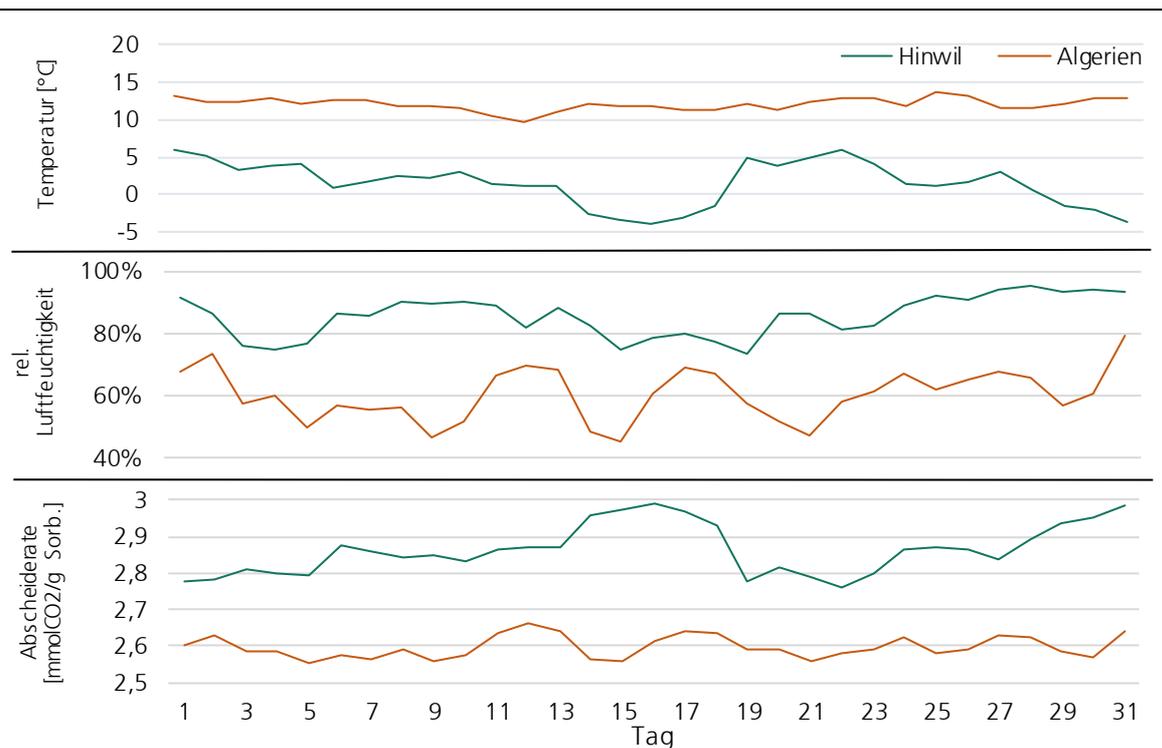


Abbildung 14 – Verlauf der Temperatur, der rel. Luftfeuchtigkeit und der Abscheiderate des Adsorptionsmittels am Standort Hinwil und einem Beispielstandort in Algerien, eigene Darstellung auf Basis von [90]

Durch die Addition der Abscheidungsraten über den Zeitraum eines ganzen Jahres, kann die jährlich abgetrennte Menge an CO₂ pro Masse Sorptionsmittel bestimmt werden. Mit der beschriebenen Methode wird für den Standort Hinwil eine jährliche abgeschiedene Stoffmenge von 997,6 mmol pro Gramm Sorptionsmittel bestimmt. Für den Standort Algerien werden 930,5 mmol pro Gramm Sorptionsmittel und somit eine um 6,7 % geringere Abscheidungsleistung festgestellt.

Der Annahme folgend, dass die Pilotanlage der Firma *Climeworks AG* pro Jahr eine mögliche CO₂-Produktion von 900 t am Standort Hinwil vorweist, kann ebenfalls die Masse des genutzten Sorptionsmittels bestimmt werden [103]. Um die angegebene Menge an Kohlenstoffdioxid pro Jahr aus der Umgebungsluft zu filtern, müssen 20,49 t des Adsorptionsmittels verwendet werden. Da die Pilotanlage aus 18 Adsorptions-Einheiten besteht, entfallen folglich 1,14 t des Materials auf jedes Segment. [103]. In der Patentschrift *AU 2014255974 B2* der Firma *Climeworks AG*, welches ein Niederdruckverfahren für die Abtrennung von CO₂ aus der Umgebungsluft durch einen Adsorptionsgastrennungsprozess beschreibt, wird darauf verwiesen, dass je Adsorptionseinheit, 500 bis 1.000 kg des Sorptionsmaterials Verwendung finden [104].

Die Luftfeuchtigkeit sowie die CO₂-Konzentration der zugeführten Luft beeinflussen bei dem untersuchten Adsorptionsmittel die Menge an gebundenem CO₂ je Regenerationszyklus [102]. Die DAC-Pilotanlage am Standort Hinwil ist etwa 35 m von dem Schlot der

Kehrichtverbrennungsanlage entfernt, dies wird durch einen Kartenausschnitt in Anhang C verdeutlicht. Durch Verbrennungsprozesse wird durch das Rauchgas CO₂ sowie Wasser an die Umgebungsluft abgegeben. Ein Zusammenhang zwischen einem Anstieg der CO₂-Volumenkonzentration in der Umgebungsluft und räumlich in Verbindung stehenden Verbrennungsprozessen konnte in einer experimentellen Messung im urbanen Gebiet, durch die Universität Duisburg, nachgewiesen werden [105]. Daher ist es fraglich, inwieweit diese Ausgangsbedingungen den DAC-Prozess am Standort Hinwil zusätzlich begünstigen

Viele Studien verwenden die Angaben zur Abscheidemenge in Verbindung mit den Kosten der Pilotanlage von der Firma *Climeworks AG* [53, 106]. Da die angenommenen Kosten für DAC-Anlagen nach dem heutigen Kenntnisstand für die Jahre 2030-2050 durch Lernratenmodelle errechnet werden, können etwaige nicht korrekte Annahmen, zu Fortpflanzungsfehlern führen. Aus Sicht des Autors besteht somit ein Forschungsbedarf um den Einfluss des Abgasschlotes neben der CO₂-Abscheideeinrichtung zu quantifizieren.

Um einen möglichen Einfluss der Umweltbedingungen auf die DAC-Technologie in einer Sensitivitätsanalyse abzubilden, werden zwei unterschiedliche Annahmen für eine Performance-Korrektur verwendet. Einerseits werden die Anlagenkosten anhand von 1,14 t Sorptionsmittel je Adsorptionseinheit und regional vorkommenden Umweltbedingungen nach der beschriebenen Methode skaliert. Dieser Fall wird fortan mit dem Kürzel *Korr. 1* gekennzeichnet. Andererseits werden die Anlagenkosten ausgehend von 1 t Sorptionsmittel je Adsorptionseinheit sowie der regionalen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen berechnet. Im Ergebnisteil wird in diesem Fall auf das Kürzel *Korr. 2* verwiesen.

3.2 Bedarfsanalyse des Luftverkehrs

Im folgenden Kapitel wird eine Methode zur Darstellung des räumlichen und zeitlichen Treibstoffbedarfes von Flughäfen innerhalb der europäischen Union entwickelt. Hierzu wird der Verbrauch von Flugzeugen für den Passagier- sowie Gütertransport verwendet, um den Kerosinverbrauch einzelner Routen zu bestimmen. Das Vorgehen wird anhand von Verbrauchsdaten einzelner Flughäfen überprüft, die auf Anfrage zur Verfügung gestellt wurden. Diese Arbeit bezieht sich ausschließlich auf den gewerblichen Flugverkehr für den Passagier- und Warentransport. Nichtgewerbliche Flugbewegungen mit Motorflugzeugen, Hubschraubern, Segelflugzeugen sowie Ultraleichtflugzeuge werden im Rahmen der Bedarfsberechnung nicht betrachtet.

3.2.1 Datengrundlage

Innerhalb des europäischen Wirtschaftsraums sammelt das Statistische Amt der Europäischen Union (Eurostat) Daten für die Erstellung amtlicher europäischer Statistiken. Im Rahmen der Verordnung (EG) Nr. 437/2003 des Europäischen Parlaments und des europäischen Rats müssen alle EU-Mitgliedsstaaten Daten über Personenbeförderung sowie Fracht im Flugverkehr erfassen und übermitteln. Auf der Website von Eurostat werden diese Daten länderweise gesammelt und kostenfrei bereitgestellt. Hierdurch können die Routen der einzelnen Flughäfen identifiziert werden. Zudem wird die Anzahl der transportierten Passagiere auf der jeweiligen Route monatlich angegeben. [107]

3.2.2 Kraftstoffbedarf von Flugzeugen

Der Treibstoffverbrauch der einzelnen Flugzeuge hängt von verschiedenen Faktoren ab. Abhängig vom Flugzeugtyp unterscheiden sich die Größe, das Gewicht und die verbaute Antriebstechnik. Neben dem Flugzeugtyp wirkt sich außerdem die Auslastung des Flugzeugs durch Passagiere oder Fracht, die Fluggeschwindigkeit und der Landeanflug auf den Verbrauch aus.

Um den Verbrauch eines Flugzeugs in Abhängigkeit der Strecke zu ermitteln, werden mit Hilfe des Flugemissionsrechners, der Firma *atmosfair gGmbH* die CO₂-Emissionen bestimmt und anschließend in die benötigte Menge Treibstoff umgerechnet. Der Emissionsrechner bedient sich hierbei wissenschaftlich unabhängigen Quellen. Die Plausibilität des Emissionsrechners konnte u.a. durch das Umweltbundesamt bestätigt werden. [108]

Die online zugänglichen Emissionsberechnungen beziehen sich auf die im Flug anfallenden Treibstoffbedarfe. Diese werden durch die Datenbank und Software „*Piano-x*“ der Firma *Lissys Ltd.* berechnet. *Piano-x* erzeugt für den gewählten Flugzeugtyp in Abhängigkeit der jeweiligen Nutzlast ein Flugprofil. Für jede Flugphase wird mit strömungsdynamischen Annahmen sowie den Kennwerten des flugzeugspezifischen Standardtriebwerks ein Verbrauch berechnet. Der *atmosfair*-CO₂-Kalkulator verfeinert die Ergebnisse indem Umwege, Warteschleifen wie auch der Bodenbetrieb berücksichtigt werden. In der Luftfahrt werden nach Verordnung (EG) Nr. 261/2004 des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates, Flugdistanzen in Kurz-, Mittel-, und Langstrecken unterschieden. Da sich diese Klassifizierung jedoch lediglich mit Regelungen für Ausgleichs- und Unterstützungsleistungen für Fluggäste auseinandersetzt, handelt es sich hierbei nicht um eine technische Richtlinie, aus der sich feste Grenzen oder Restriktionen ergeben. Da Flugzeuge jedoch bei verschiedenen langen Strecken unterschiedlichen

Bedingungen ausgesetzt sind, werden Flugzeugtypen dem Anwendungsbereich entsprechend konzipiert.

Analog zu der Unterteilung in der genannten Verordnung, werden Flugzeuge in der Konstruktion auf die jeweiligen Strecken angepasst. Es können beispielsweise bei der Konstruktion die Tankgröße bzw. die aerodynamische Formung des Flugzeugs angepasst werden. Die Form kann abhängig von dem vorgesehenen Betrieb optimiert werden. Um eine genaue Berechnung zu gewährleisten, wurde die Treibstoffbedarfsrechnung in dieser Arbeit für den Personenverkehr in Flüge 'unter 3.500 km' und 'über 3.500 km' unterschieden. Des Weiteren wurden Daten von unterschiedlichen Flugzeugtypen sowie branchenübliche Auslastungsraten verwendet. Für die unterschiedlichen Streckenkategorien beim Passagierverkehr ergeben sich verschiedene Verbräuche in Abhängigkeit des verwendeten Flugzeugtyps sowie der zu fliegenden Strecke. In Abbildung 15 wird der gesamte Treibstoffverbrauch eines Fluges (Y-Achse) der zurückgelegten Strecke (X-Achse) gegenübergestellt. Die Lage der Datenpunkte zeichnet einen Trend ab. Aus diesem Zusammenhang kann für jede beliebige Route der Treibstoffbedarf, in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke und Streckenkategorie, ermittelt werden.

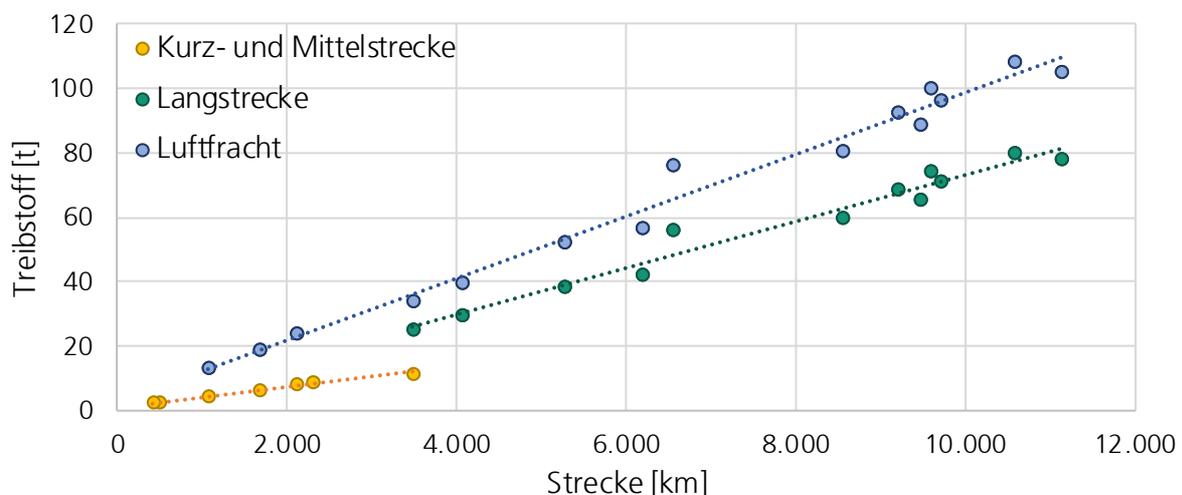


Abbildung 15 – Treibstoffbedarf von Flugzeugen in Abhängigkeit von der Strecke, eigene Darstellung

3.2.3 Auslastungsraten im Luftverkehr

In Tabelle 8 sind die Annahmen für die aufgeteilten Flugklassen dargestellt. Es werden drei neuwertige Flugzeuge als Referenz aufgeführt. Die Kenndaten wie Anzahl der Sitzplätze sowie die angegebene Traglast fließen in die Treibstoffberechnung mit ein. Es ist zu erkennen, dass für das Segment Luftfracht eine Auslastung von nur 46,7 % angenommen wird. Dieser Wert beschreibt die weltweite Auslastung von Frachtflugzeugen im Jahr 2019 und gilt als regulärer Wert in der Logistikbranche. Die Auslastungsrate in den Jahren 2011 bis 2018 betrug zwischen

43 und 49 %. Zwar gibt es vereinzelt Firmen, welche Ladefaktoren von über 70 % auf ihrer Internetseite veröffentlichen, jedoch wird dies im Branchenvergleich als ein außergewöhnlich hoher Wert bewertet. [109]

Tabelle 8 – Annahmen zu Flugklassen

Strecken-Kategorie	Strecken-restriktion	Flugzeugtyp	Sitzplätze/Traglast	Auslastung
Kurz- und Mittelstrecke	≤ 3.500 km	Airbus A320 Neo	180 Sitze	81,2 % [110]
Langstrecke	> 3.500 km	Airbus A350-900	319 Sitze	81,2 % [110]
Luftfracht	-	Boing 777-300ER	104 t	46,7 % [111]

Aus der Anzahl der Passagiere sowie der Auslastungsrate und Sitzplatzanzahl aus Tabelle 8, kann die Anzahl der auf der betrachteten Strecke theoretisch durchgeführten Flüge errechnet werden. Durch die Verrechnung mit den Regressionen aus Abbildung 15 kann der Treibstoffbedarf bestimmt werden. Die errechneten Treibstoffmengen werden dem jeweiligen Startflughafen zugeordnet.

Die Ermittlung des Treibstoffbedarfs für den Frachtflugverkehr erfolgt analog. Aus den Daten von *Eurostat* wird die transportierte Luftfracht in Tonnen und Strecke angegeben. Mit der maximalen Traglast und der Auslastungsrate aus Tabelle 8 wird eine durchschnittliche Beladelastr definiert. Die Anzahl der auf einer Strecke durchgeführten Flüge, ergibt sich aus der Division der vorab definierten Kennwerte. Im Zusammenhang mit den Verbrauchsdaten des festgelegten Flugzeugs kann so der Treibstoffbedarf für den Warentransport über den Luftweg bestimmt werden. Die Bedarfe werden ebenfalls dem jeweiligen Startflughafen zugeordnet.

Die Metadaten der Passagieranzahl und der Masse der transportierten Luftfracht stehen als monatliche Werte zur Verfügung. Somit kann bei diesem Verfahren neben dem eigentlichen Bedarf der unterschiedlichen Flughäfen auch eine Saisonalität abgeleitet werden. [107]

3.3 Bedarfs- und Transportkostenanalyse des Containerschiffsverkehrs

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Modell für die Berechnung des Treibstoffbedarfs der Containerschiffahrt beschrieben. Auf der Basis von öffentlich zugänglichen Schiffsfahrplänen werden hierfür real befahrene Schiffsrouten analysiert. Im Zusammenspiel mit Daten aus der Literatur und schiffsspezifischen Informationen, werden Verbrauchswerte von insgesamt 384 Schiffen den einzelnen Streckenabschnitten zugeordnet. Die untersuchten Schiffe werden in Anhang D aufgelistet. Um einen umfassenden Technologievergleich zwischen der P2CE-Technologie und dem DAC-basierten Antriebskonzept zu ermöglichen, werden in einer Wirtschaftlichkeitsberechnung die betriebswirtschaftlichen Faktoren der Containerschiffahrt

beider Technologien gegenübergestellt. Da der Zuwachs des Transportbedarfs sowie die Verschiebung der Routenanteile nur schwer vorauszusagen sind, basiert diese Modellierung auf der Containerschiffahrtsflotte aus dem Jahr 2020. Der wirtschaftliche Vergleich bezieht sich jedoch auf angenommene Treibstoffkosten der Technologien P2CE und DAC für das Jahr 2030. In der Aufgabenstellung wurde die Betrachtung der Containerschiffahrt auf Wasserfahrzeuge mit mehr als 10.000 TEU begrenzt. Um die relevanten Schiffe zu bestimmen wurde ein Marktscreening durchgeführt. In Abbildung 16 wird die Verteilung der Ladekapazität sowie der Baujahre der untersuchten Schiffe dargestellt.

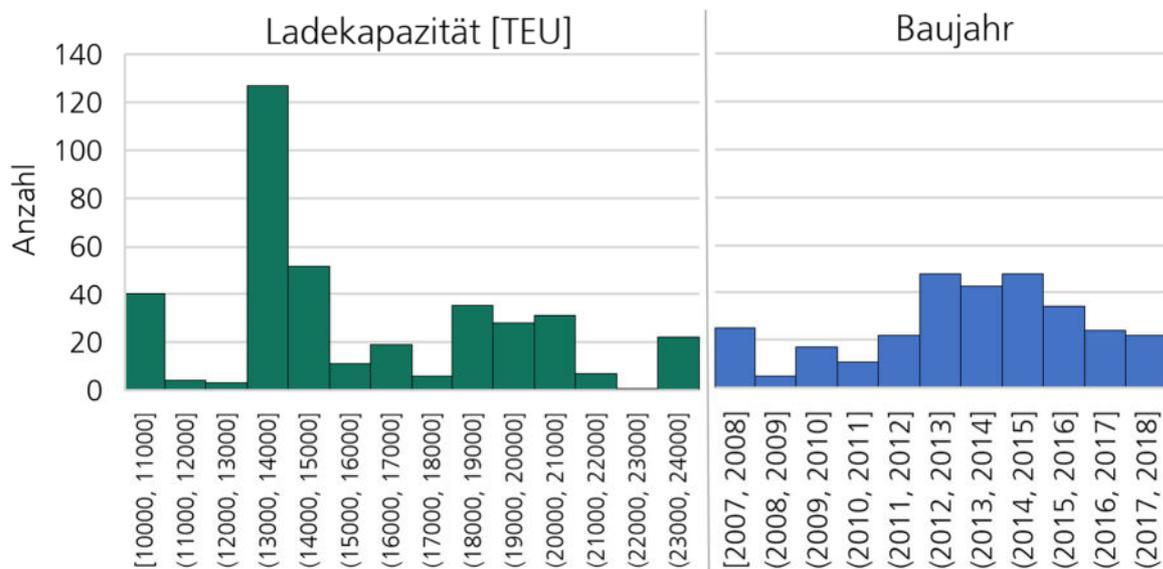


Abbildung 16 – Ladekapazität und Baujahr der betrachteten Containerschiffe, eigene Darstellung

Für die Berechnung der jährlichen Kapitalkosten und Investitionsausgaben wird die Kapitalwertmethode verwendet. Für die Kapitalkosten, engl.; *weighted average cost of capital*, (WACC), wird für erneuerbare Energien in einer globalen Betrachtung ein Zinssatz von 10 % angenommen [94]. Durch die Multiplikation der Investitionskosten mit dem Kapitalrückzahlungsfaktor, engl.; *capital recovery factor* (*crf*) kann eine jährliche Zahlung errechnet werden, welche aus den Kapitalkosten und der auf die Laufzeit aufgeteilten Investitionskosten besteht. In Formel 1 ist die Berechnung des *crf* dargestellt.

$$crf = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (1)$$

- crf*: Kapitalrückzahlungsfaktor [-]
- i*: Zinssatz [%]
- n*: Laufzeit [a]

3.3.1 Routenidentifikation

MarineTraffic, *Vesseltracker* und *Fleetmon* sind Unternehmen, die historische Daten von Schiffspositionen und Information über den Betrieb der Schiffe verwalten und vermarkten. Die Positionsdaten entstammen hierbei dem *automatic identification system (AIS)*, welches durch den Austausch von Navigations- und anderen Schiffsdaten die Sicherheit erhöhen, sowie die Koordination des Schiffsverkehrs vereinfachen soll. Das auf Funk basierende System wurde im Jahr 2000 durch die IMO als verbindlicher Standard eingeführt. Da die Reichweite von Empfängerstationen auf Land begrenzt ist, können Schiffe in weiter Entfernung nicht erreicht und folglich auch keine Positionsdaten erfasst werden. Eine Erweiterung der Positionsdaten kann zusätzlich durch Satellitendaten erfolgen. Die Anfrage nach den von Satelliten erfassten Positionsdaten bei der Firma *Fleetmon* ergab, dass der finanzielle Aufwand von 5.000 € im Rahmen dieser Masterarbeit nicht vertretbar ist [112]. Aus diesem Grund kann nicht auf diese Datenbasis zurückgegriffen werden. Alternativ wurden auf frei verfügbare Daten, bereitgestellt durch Schiffsfahrplänen der großen Reedereialliancen, zurückgegriffen. Diese werden den Kunden der Logistikunternehmen für eine bessere Planung der Warensendungen zur Verfügung gestellt. [113–115]

Die betreibenden Reedereien veröffentlichen die Schiffsfahrpläne online. Da die Angaben der Reedereien aus den Schiffsfahrplänen in unterschiedlichem zeitlichen Umfang angegeben werden, müssen die Daten vereinheitlicht werden. Für die Schiffe werden neben den anzufahrenden Häfen und der *Voyage Nummer*, die geplanten Ankunfts- und der Abfahrtszeitpunkte angegeben. So kann eine Fahrzeit für die jeweiligen Routenabschnitte ermittelt werden. Außerdem kann die Verweildauer in dem jeweiligen Hafen errechnet werden. Mit den Rohdaten wird eine Rundfahrt des jeweiligen Schiffes ermittelt. Neben der Abfolge der angefahrenen Häfen wird die benötigte Zeit auf den zugehörigen Streckenabschnitten erfasst.

Die Routenführung von Frachtschiffen wird grundsätzlich durch das akquirierbare Ladeaufkommen und der Transportnachfrage in den Häfen des Fahrgebiets bestimmt. Zudem wird das zu transportierende Gut in Abhängigkeit der vorliegenden Be- und Entladeinfrastruktur sowie auf die zu passierenden Streckenabschnitte und der zur Verfügung stehenden Containerschiffe aufgeteilt. Es haben sich neben den traditionellen Verbindungen von zwei Häfen auch Routen entwickelt, die mehrere aufeinander folgende Ziele miteinander verbinden. Die Routenführungen können sich hierbei in Dreiecks-, Pendel, Multistring- oder Round-The-World-Dienste unterscheiden. Alle Dienste haben gemein, dass nach der Abfolge von allen anzufahrenden oder mehrfach anzufahrenden Häfen der jeweilige Starthafen wieder erreicht wird. [116]

Die Überfahrt von einem Start- zu einem Folgehafen erfolgt über eine Verbindungsroute. Diese Route kann als die kürzeste Verbindungsstrecke über festgelegte Wasserstraßen ermittelt werden. Um alle gefahrenen Routenabschnitte und die Verbindungswege zwischen den jeweiligen Start- und Endhafen, zu ermitteln, wird auf den *Marnet* Datensatz zurückgegriffen [117]. Für die Errechnung der Streckenlängen wird die Software QGIS verwendet. Mittels dieser frei verfügbaren Geoinformationssystem-Software wird unter Verwendung der Koordinaten der anzufahrenden Häfen, die kürzeste Verbindungsstrecke ermittelt. Aus der Analyse der Schiffsfahrpläne wurden insgesamt 95 angefahrne Häfen identifiziert. In Anhang E können diese mit zugehörigen Koordinaten eingesehen werden. In Abbildung 17 werden in Grün alle identifizierten Häfen abgebildet. In Rot werden die möglichen Routen zwischen allen Häfen dargestellt. In Hellgrau ist das Verbindungsnetz *Marnet* hinterlegt. Es fällt auf, dass von der Westküste Asiens, zur Ostküste Amerikas keine Verbindung dargestellt ist. Dies liegt an einem Fehler in dem Verbindungswerkzeug der Software QGIS. Dieses kann keine Verbindungen über den Rand einer zweidimensionalen Karte hinweg erzeugen. Die nicht erzeugten Strecken wurden manuell durch die Bestimmung der direkten Verbindungen auf dem Seeweg errechnet.

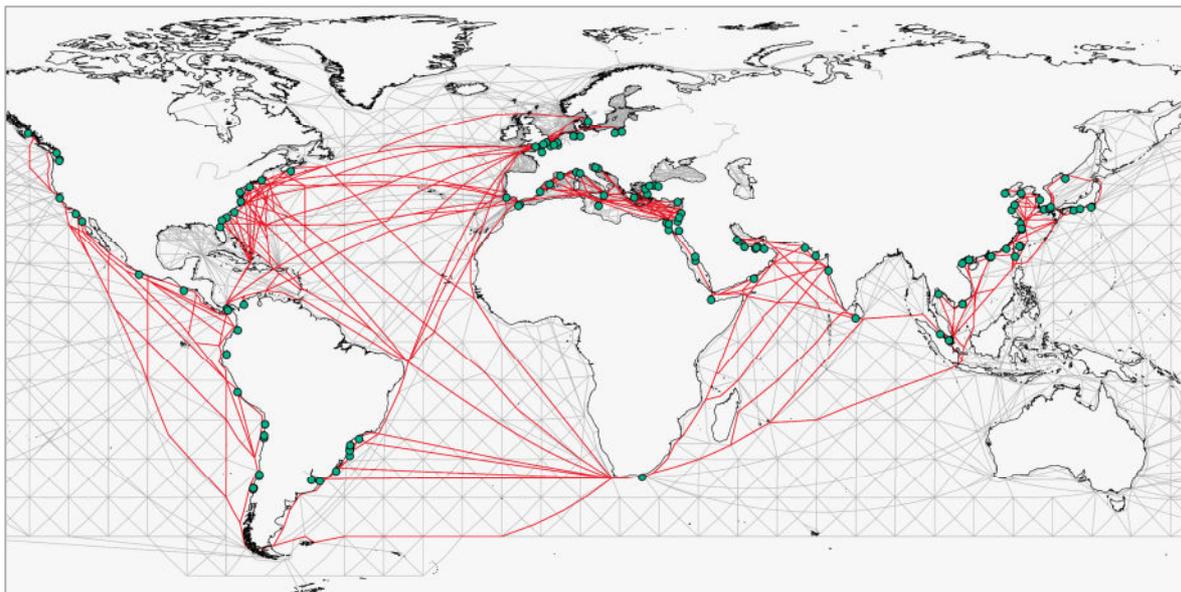


Abbildung 17 – Routen zwischen den identifizierten Häfen, eigene Darstellung auf Basis von [117]

3.3.2 Kraftstoffbedarf von Containerschiffen

Der Kraftstoffbedarf von Schiffsmotoren ist abhängig von der genutzten Maschinenleistung, welche sich aus der angestrebten Geschwindigkeit ergibt [66]. Schiffsmotorenhersteller beziffern den Wirkungsgrad von modernen Zweitakt-Dieselmotoren auf 55 %. Mit einem Verbrauch von 0,171 kg Marinediesel und elektrischer Nutzung der Abwärme kann eine Kilowattstunde Wellenarbeit für den Vortrieb des Schiffes bereitgestellt werden [118]. Um für

die identifizierten Containerschiffe individuelle Treibstoffbedarfe zu errechnen wird aus Literaturangaben ein Berechnungs-Schema entwickelt.

Schönknecht sieht mit der sogenannten „Admiralitätsformel“ vor, dass der Treibstoffbedarf eines Containerschiffs proportional mit der dritten Potenz, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit steigt. Da die Ergebnisse nach Schiffs-Größencluster in 14 Einzelgraphen aufgeteilt sind, wird jedoch keine allgemeine, größenunabhängige Verbrauchsberechnung beschrieben. Ausgehend von den gestaffelten Ergebnissen wurde aus den einzelnen Graphen eine Funktion entwickelt welche aus der Gesamt-Tragfähigkeit eines Schiffes und der Geschwindigkeit einen Treibstoffbedarf in Tonnen pro Tag errechnet. Die Funktion wird in Formel 2 beschrieben. [66]

$$\begin{aligned} \dot{M}_{Kraftstoff} = & (-7,568 \cdot 10^{-12} \cdot v_{Schiff}^2 + 2,944 \cdot 10^{-11} \cdot v_{Schiff} + 2,230 \cdot 10^{-11}) \cdot DWT^2 \quad (2) \\ & + (6,806 \cdot 10^{-6} \cdot v_{Schiff}^2 - 7,584 \cdot 10^{-5} \cdot v_{Schiff} + 2,126 \cdot 10^{-4}) \cdot DWT \\ & + (0,175 \cdot v_{Schiff}^2 - 4,312 \cdot v_{Schiff} + 25,302) \end{aligned}$$

$\dot{M}_{Kraftstoff}$: Kraftstoffverbrauch [t/Tag]
 v_{Schiff} : Geschwindigkeit [Knoten]
 DWT : Gesamt-Tragfähigkeit [t]

In Abbildung 18 wird der Berechnungsansatz des Treibstoffbedarfs aus Formel 2, als Matrix dargestellt. Die Y-Achse beschreibt den täglichen Verbrauch an Marinediesel in Tonnen. In Verbindung mit der zuvor beschriebenen Information zu den Routen kann mit dieser Funktion der Verbrauch eines Containerschiffs einem Routenabschnitt zugeordnet werden.

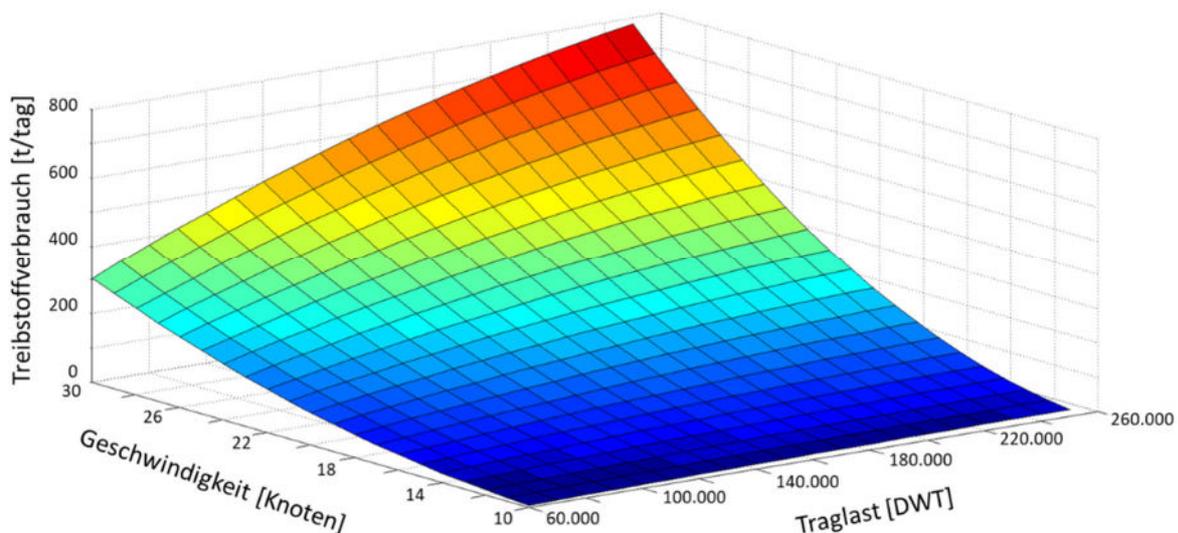


Abbildung 18 – 3D-Matrix zum Treibstoffverbrauch von Containerschiffen, eigene Darstellung

3.3.3 Wirtschaftlichkeit Containerschiffahrt

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Containerschiffes werden alle relevanten anfallenden Kosten einer definierten logistischen Dienstleistung gegenübergestellt. Hierfür werden die jährlichen Gesamtkosten durch die Anzahl der transportierten 20-Fuß-Container geteilt. Um einheitliche Werte zu erhalten, wird die Bezugsstrecke auf die Route Shanghai-Hamburg mit der Gesamtlänge von 22.000 km festgelegt.

Da die Frachtraten und das Fassungsvermögen des Kraftstofftanks der realen Schiffe nicht vorliegen, wird auf Literaturwerte zurückgegriffen. Die durchschnittliche Auslastungsrate der Schiffe wird auf 90 % festgelegt. Für die Tankgröße werden 5.000 t angenommen. Die Laufzeit eines Containerschiffes wird in der Rechnung auf 27 Jahre festgelegt. [66]

3.3.3.1 Fixkosten

Im Folgenden Abschnitt werden die Annahmen und das Zusammenspiel der fixen Kosten der Einzelposten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung dargelegt. Die Investitionskosten können verschiedenen Kategorien zugeordnet werden. Dazu gehören die Kategorien Containerschiff, Antriebseinheit, Tanksystem, Containersatz, Reservekapazität, Kosten für Verwaltung und Versicherung sowie die Personalkosten. Bei den Annahmen für diese Kosten handelt es sich um Literaturwerte, welche inflationsbereinigt dargestellt werden.

Um die **Investitionskosten von Containerschiffen** in unterschiedlichen Größenclustern zu bestimmen wird ein Regressionsmodell nach Cullinane und Khanna mit einer Aktualisierung durch Eschmann verwendet [119, 120]. Der Schiffspreis ist abhängig von der Beladungsmenge in TEU. In Formel 3 ist die Berechnungsmethode dargestellt. Die Rechenergebnisse werden durch den Euro/Dollar-Wechselkurs korrigiert und für das Jahr 2020 inflationsbereinigt.

$$\ln(\text{Schiffspreis in Tausend-US-Dollar}_{2000}) = 4,4366 + 0,72 \cdot \ln(NTEU) \quad (3)$$

Die Kosten der **Antriebseinheit** sind abhängig von der installierten Motorleistung eines Containerschiffes. Da der produzierte drop-in-fähige regenerative Kraftstoff dem herkömmlich verwendeten Marinediesel ähnelt, können bestehende spezifische Investitionskosten der Antriebseinheit aus der Literatur entnommen werden. Es werden 385 €/kW für das Berechnungsmodell angenommen. [6]

Die Kosten für das **Tanksystem** können ebenfalls von bestehenden Literaturangaben übernommen werden. Diese werden mit 83 €/MWh angenommen. Das entspricht, bei einem festgelegten mitgeführten Treibstoffgewicht von 5.000 t, einem Investitionswert von 5,01 Mio.€. [6]

Um den Umlauf der **Transportcontainer** zu gewährleisten muss die 2,4-fache Anzahl pro Containerstellplatz vorgehalten werden. Diese Anzahl teilt sich in Kühl-, Tank-, sowie 20- und 40-Fuß-Container auf. Hieraus ergeben sich gewichtete und inflationsbereinigte Kosten von 2.498 €/TEU. [120]

Für den Betrieb von Containerschiffen über 2.000 TEU wird eine konstante Besatzungsstärke von 24 Personen benötigt. Die **Personalkosten** müssen mit dem Faktor 1,75 multipliziert werden, um eine dauerhafte Besetzung des Schiffs bedingt durch Urlaub und Ausfall bereitzustellen. Nach deutschem Heuertarifvertrag belaufen sich die jährlichen Gesamtkosten auf 5,11 Mio.€. [66, 121]

Für **Versicherung und Verwaltung** werden 4 % der Investitionskosten des Schiffes veranschlagt. Die zusätzliche Vorhaltung von Containerschiffen wird als Reservekapazität betitelt. Nach Schönknecht belaufen sich die Kosten auf ein Siebtel der übrigen Fixkosten. [66]

3.3.3.2 Variable Kosten

Die variablen Betriebskosten lassen sich in Fahrt und Standkosten aufteilen. Während das Schiff auf den Verbindungsrouten Treibstoff verbraucht, entstehen in den Häfen Liege- sowie Umschlagkosten. [66, 122]

Für die Berechnung des Treibstoffverbrauchs werden die Geschwindigkeits- sowie Routendaten aus Kapitel 3.3.1, in Verbindung mit der Verbrauchsrechnung aus Kapitel 3.3.2 verwendet. Durch die erzeugte Geoinformation kann der Verbrauch einer Route zugeordnet werden. Um die **Treibstoffkosten** zu erhalten werden die Verbrauchswerte mit den Kraftstoffbereitstellungskosten verrechnet.

Die **Hafenkosten** sind abhängig von der Größe und Auslastung der Containerschiffe. Für den Umschlag eines 20-TEU Containers werden 131 € und für einen 40-TEU-Container werden 156 € für den Umschlag veranschlagt. Die Liegekosten werden je 24 Stunden für ein Schiff mit 10.000 TEU mit 84.804 € verrechnet. Mit einer Ladekapazität von 20.000 TEU werden 143.500 € veranschlagt. Zwischenwerte werden durch Interpolation bestimmt. [66]

3.3.4 P2CE-Antriebstechnologie in der Containerschiffahrt

Um die theoretischen Mehrkosten eines Schiffes mit P2CE Antriebstechnologie, zu errechnen müssen weitere Annahmen für den Betrieb sowie zusätzliche Anlagenkosten des Schiffes festgelegt werden.

3.3.4.1 Anlagentechnik

Wie in Kapitel 2.3.5.1 beschrieben werden für die Expansion des O₂ und die Kompression des CO₂ Turbomaschinen benötigt. Die benötigte Verdichter-, bzw. Expanderleistung hängt direkt von dem Massenstrom des abzuspeichernden CO₂ bzw. O₂ ab. Aus diesem Grund wird die Größe der Turbomaschinen anhand der maximalen Leistung der Antriebseinheit ausgelegt. Um den von der Motorleistung abhängigen maximalen Massenstrom von CO₂ im Abgas zu bestimmen, muss ausgehend vom Treibstoffbedarf das Verbrennungsprodukt errechnet werden. In Formel 4 wird die Abhängigkeit des CO₂-Massenstroms dargestellt.

$$\dot{M}_{CO_2} = \frac{P_{Motor}}{\eta_{Motor}} \cdot \frac{3,15}{E_{Treibstoff}} \cdot \frac{1}{3600} \quad (4)$$

\dot{M}_{CO_2} :	Massenstrom des Kohlenstoffdioxids [kg/s]
P_{Motor} :	Leistung der Antriebseinheit [kW]
η_{Motor} :	Wirkungsgrad der Antriebseinheit [%]
$E_{Treibstoff}$:	Energiegehalt des Treibstoffs [kWh/kg]

Formel 5 beschreibt die Errechnung der Leistung des CO₂-Verdichters. Es wird der errechnete CO₂-Massenstrom mit der Verdichterarbeit multipliziert. Um das CO₂ in einen für die Verflüssigung günstigen thermodynamischen Zustand zu überführen, wird in einem vierstufigen Kompressionsverfahren eine Arbeit von 280 kJ/kg benötigt. [39]. Neben den Komprimierungseinheiten des Kohlenstoffdioxids werden für die Expansion des Sauerstoffs ebenfalls Strömungsmaschinen verwendet. Die hierfür benötigte Leistung ist äquivalent zu den Komprimierungseinheiten. Die Kosten für beide Verdichter werden mit 1.650 €/kW verrechnet. Für die Expansionsmaschinen wird ein finanzieller Aufwand von 3.300 €/kW angenommen. [123]

$$P_{CO_2-Verd.} = \dot{M}_{CO_2} \cdot W_{Verdichter} \quad (5)$$

$P_{CO_2-Verd.}$:	Leistung des Kohlenstoffdioxidverdichters [kW]
\dot{M}_{CO_2} :	Massenstrom des Kohlenstoffdioxids [kg/s]
$W_{Verdichter}$:	Verdichterarbeit [kJ/kg]

In dem P2CE-Konzept wird der für die Verbrennung benötigte Sauerstoff an Bord in Flüssiggastanks mitgeführt. Da durch die fortschreitende Verbrennung fortwährend Raum in den Tanks frei wird, kann das entstehende CO₂ bilanziell eingelagert werden. Sofern die Tankssysteme aus mehreren Einzeltanks bestehen, ist eine bivalente Nutzung möglich. Für die Flüssiggastanks werden die volumetrischen Kosten von LNG-Tanks angenommen. Die volumetrischen Kosten werden allerdings auf die Dichte von Sauerstoff umgerechnet, woraus sich Kosten von 3.120 €/m³ ergeben. [123]

3.3.4.2 Betankungspunkte

Die Wirtschaftlichkeit eines Containerschiffs ist zum einen von den aufzuwendenden Kosten und zum anderen von der Transportleistung abhängig. Wie in Kapitel 2.3.5.3 beschrieben, passieren die Containerschiffe auf ihren Routen Standorte mit guten EE-Ressourcen. Da für Schiffe mit der P2CE-Technologie neben Treibstoff auch der Austausch von Kohlenstoffdioxid für den Syntheseprozess an Land bzw. Sauerstoff für den Verbrennungsprozess an Bord gewährleistet werden muss, werden neue Betankungspunkte auf den Routen festgelegt. Dies hat den Vorteil gegenüber der herkömmlichen Betankung in den Häfen, dass die Belieferung der Begleitgase sowie des Treibstoffs entfallen. Nachteilig wirkt sich der zusätzliche Stopp der Schiffe auf die Jahrestransportleistung aus, da für den Umweg sowie die Dauer der Betankung Zeit benötigt wird. Die angenommenen Produktionsstandorte werden in Anhang B mit zugehörigen Koordinaten aufgelistet. In Abbildung 19 werden in Grün beispielhaft 13 der 21 gewählten Standorte für mögliche Betankungspunkte dargestellt. In Anhang F werden auf einer Karte alle Standorte abgebildet. Die Standortwahl orientiert sich nach dem Angebot von EE-Ressourcen sowie der Nachfrage an Treibstoff bedingt durch ein hohes Verkehrsaufkommen auf den Routenabschnitten. Bei der Standortwahl wurden Schutzgebiete und Lebensräume von geschützten Arten gemieden [124, 125].

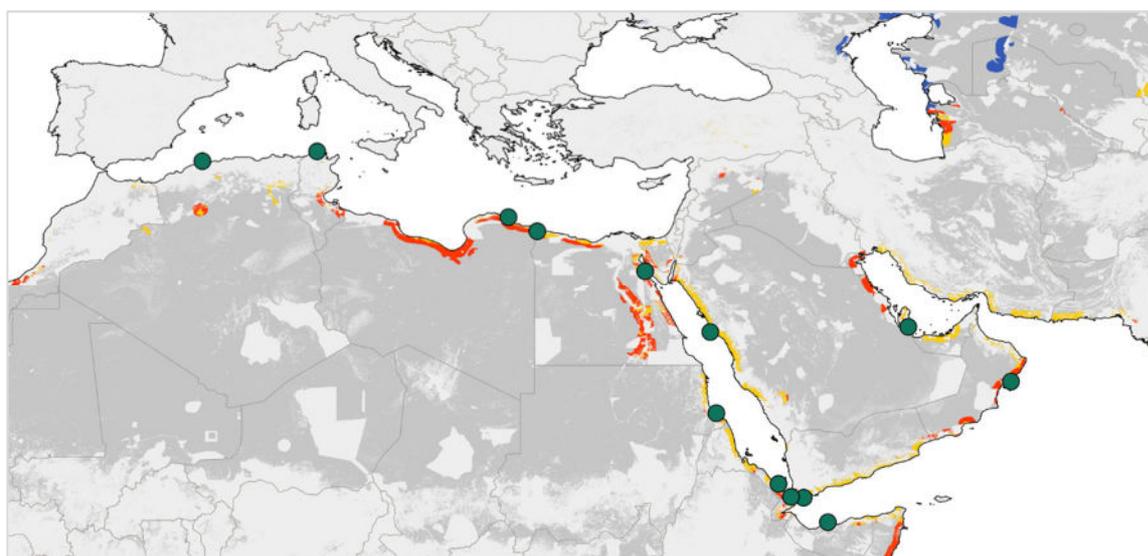


Abbildung 19 – P2CE-Betankungspunkte, eigene Darstellung mit identifizierten Vorrangflächen für PtX-Kraftstoffproduktion, eigene Darstellung unter Verwendung von Daten aus [126]

In Abbildung 19 werden Teilergebnisse der Studie DeV-KopSys verwendet. Hieraus konnte die Standortidentifikation abgeleitet werden. In Grau werden Flächen mit guten EE-Ressourcen dargestellt. Farblich werden Standorte markiert, die sich im Besonderen für die Produktion von regenerativem Kraftstoff eignen. In Blau werden Standorte gekennzeichnet, welche ein hohes Potential an Windenergie vorweisen. Standorte mit einem hohen solaren Strahlungseintrag

werden in Gelb dargestellt. Orange weist Hybrid-Standorte aus, die sich sowohl für die Solar- als auch für die Windenergie eignen. [126]

3.3.4.3 Betankungsstrategie

Der Modellierung liegt folgende Annahme zu Grunde: Containerschiffe, die mit dem P2CE-Konzept betrieben werden, können an den in Kapitel 3.3.4.2 vorgestellten Standorten tanken. Durch zusätzliche Stopps, verringert sich die im Jahr zurücklegbare Strecke der Schiffe und folglich der Umfang der anbietbaren Transportdienstleistung. Wird ein großer Tank für den Sauerstoff bzw. das Kohlenstoffdioxid gewählt, sinkt die Gütertragungsfähigkeit eines Schiffes. Aus dieser Gegebenheit ergibt sich ein Optimierungsproblem. Nimmt die Tankgröße ab, so kann mehr Fracht geladen werden, jedoch muss das Schiff häufiger Tankstopps einlegen. Hingegen benötigt ein größerer Tank eine geringere Anzahl an Tankstopps, jedoch wird die Anzahl der an Bord geladenen TEU-Einheiten verringert. Um die Kosten durch die zusätzlichen Stopps zu minimieren wird der kostengünstigste Betankungsplan sowie eine Optimierung der jeweiligen Tankgröße von jedem betrachteten Containerschiff durchgeführt.

Um dies zu erreichen werden mehrere Methoden verwendet. Zunächst wird analysiert welche Betankungspunkte die Containerschiffe auf den jeweiligen Routen passieren. Als Grenzwert wurde eine Entfernung von 500 km festgelegt, die ein Containerschiff pro Strecke zusätzlich zurücklegen muss um einen Betankungspunkt aufzusuchen. Der tatsächliche Umweg wird als Streckenverlust in die Berechnung einbezogen. Da durch die zusätzlichen Stopps im Durchschnitt weniger Ware im Betrachtungszeitraum von einem Jahr transportiert werden kann, entstehen Opportunitätskosten. Für die Bestimmung dieses Einflusses wird die Beförderungskapazität als Vergleichswert eingeführt. Diese bemisst sich an der Menge der transportierten TEU-Einheiten je Referenzstrecke die pro Jahr verschifft werden kann. Die Berechnung wird in Formel 6 dargestellt. Die Referenzstrecke wird auf 22.000 km festgelegt. Fährt ein Schiff mit 10.000 TEU pro Jahr 100.000 km, ergibt sich eine Beförderungskapazität von 45,5 kTEU_{ref}/a.

$$Kapazität_{Beförderung-TEU} = \frac{Kapazität_{Beladung-TEU} \cdot Strecke_{ges}}{Strecke_{ref}} \quad (6)$$

<i>Kapazität</i> _{Beförderung-TEU} :	Beförderungskapazität [TEU _{ref} /a]
<i>Kapazität</i> _{Beladung-TEU} :	Durchschnittliche Beladepazität [TEU]
<i>Strecke</i> _{ges} :	Jahresgesamtstrecke [km/a]
<i>Strecke</i> _{ref} :	Referenzstrecke [km]

Für die Berechnung der Transportkosten werden die Gesamtkosten auf die Anzahl der transportierten TEU je Referenzstrecke aufgeteilt. In Formel 7 wird der Zusammenhang

dargestellt. Die Jahreskosten setzen sich aus den Einzelposten aus Kapitel 3.3.3 zusammen. Zusätzlich fallen Kosten für die notwendigen Lagertanks der P2CE-Technologie, beschrieben im Kapitel 3.3.4.1, an.

$$\text{Transportkosten}_{\text{spez.}} = \frac{\text{Gesamtkosten}}{\text{Kapazität}_{\text{Beförderung-TEU}}} \quad (7)$$

Transportkosten_{spez.}: Transportkosten je TEU auf Referenzstrecke [€/TEU_{ref}]

Gesamtkosten: Summe alle Kosten pro Jahr [€/a]

Die durch zusätzliche Tankstopps verringerte Beförderungskapazität fällt auf die spezifischen Transportkosten zurück. Ebenfalls einen großen Einfluss bei der P2CE-Technik haben die Begleitgastanks. Die Größe und das Gewicht hängen direkt proportional mit der an Bord mitgeführten Treibstoffmenge zusammen. Für die Verbrennung nach dem Dieselprozess werden für ein Kilogramm Kraftstoff stöchiometrisch 3,3 kg Sauerstoff benötigt. Neben anderen Abgaskomponenten werden bei diesem Prozess 3,2 kg Kohlenstoffdioxid erzeugt [127]. Durch das zusätzliche Volumen sowie Gewicht kann weniger Fracht transportiert werden. Demnach sinkt die Anzahl der theoretisch möglichen TEU-Einheiten pro Schiffsladung.

Der Zeitaufwand berechnet sich gemäß Formel 8 durch die Addition der Anfahrt zum Betankungspunkt und der Rückfahrt zur Route sowie der für den Tankvorgang benötigten Zeit. Die An- und Rückfahrt wird durch Division der zu fahrenden Strecke, durch die jeweilige jährliche Durchschnittsgeschwindigkeit des betrachteten Containerschiffs, errechnet. Die Dauer des Tankvorgangs wird durch die abzuladende Masse an CO₂ und die aufzunehmende Masse O₂ unter Berücksichtigung des jeweiligen Tankstatus des Schiffes berechnet. Mit einer Division des angenommenen Flüssiggasvolumenstroms von 1.200 m³/h kann die aufzuwendende Zeit berechnet werden. Zusätzlich werden für jeden Tankvorgang 4 Stunden für das Rangieren am Betankungspunkt aufgeschlagen.

$$\text{Strecke}_{\text{Verlust}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} t_R + \frac{2 \cdot \text{Strecke}_{\text{Bet.}i}}{\bar{v}_{\text{Schiff}}} + \frac{V_{\text{CO}_2 i} + V_{\text{O}_2 i}}{V'_{\text{Iq}}}}{\bar{v}_{\text{Schiff}}} \quad (8)$$

<i>Strecke_{Verlust}</i> :	Streckenverlust pro Jahr [km]
<i>t_R</i> :	Zeitaufwand für Rangieren [h]
<i>Strecke_{Bet.i}</i> :	Kürzeste Streck von Route zu Betankungspunkt [km]
<i>V_{CO₂ i}</i> :	Abzuladendes Volumen an flüssigem Kohlenstoffdioxid [m ³]
<i>V_{O₂ i}</i> :	Aufzuladendes Volumen an flüssigem Sauerstoff [m ³]
<i>V'_{Iq}</i> :	Flüssiggasvolumenstrom [m ³ /h]
<i>v_{Schiff}</i> :	Durchschnittsgeschwindigkeit des untersuchten Schiffs [km/h]

Um die niedrigsten spezifischen Transportkosten (Formel 7), in Abhängigkeit des Streckenverlustes (Formel 8) zu erhalten, wird die beste Kombination aus Betankungsabfolge

sowie optimierter Größe des Tanks bestimmt. Die mögliche Reichweite eines Schiffes wird durch die Tankgröße begrenzt. Dieser wird von 2.000 t bis 6.000 t mit einer Abstufung von 100 t angenommen. Die Investitionskosten des Tanksystems werden gemäß Kapitel 3.3.3.1 angepasst und die Ladekapazität bestimmt.

Um möglichen Betankungsabfolgen zu erzeugen, wird eine Methode aus der Kombinatorik verwendet. Aus den Routeninformationen aus Kapitel 3.3.1 konnte ein durchschnittlicher jährlicher Bedarf von circa 30.000 t Kraftstoff je Containerschiff sowie eine jährliche Fahrleistung von circa 190.000 km identifiziert werden. Bei einem Kraftstofftank mit einem Fassungsvermögen von 6.000 t Kraftstoff muss ein Schiff fünf Mal pro Jahr betankt werden. Wie in Anhang G zu sehen werden auf der Strecke zwischen Shanghai und Hamburg 13 mögliche Betankungsstandorte passiert. Die gefahrene Route hat eine Strecke von 22.000 km. Demnach kann die Route etwa 8,6 Mal pro Jahr zurückgelegt werden wobei insgesamt 112 mögliche Betankungspunkte passiert werden. Durch eine Kombination ohne Wiederholung kann die Anzahl aufeinander folgender, theoretisch möglicher, Betankungsabfolgen bestimmt werden [128]. Nach Formel 9 können demnach für das aufgeführte Beispiel circa 134 Mio. Betankungsabfolgen bestimmt werden. Die Anzahl der Kombinationen bei einer Tankgröße von 2.000 t und insgesamt 15 Betankungsvorgängen pro Jahr liegt bei circa $1,6 \cdot 10^{18}$ Betankungsabfolgen. Um den Umfang der Berechnungen zu minimieren, wird der betrachteten Zeithorizont je nach Rechenaufwand angepasst.

$$Anzahl_{Betankungsabfolgen} = \binom{n}{k} \quad (9)$$

n : Anzahl der passierten Betankungspunkte [a^{-1}]
 k : Betankungen pro Jahr [a^{-1}]

Kombinationen, bei denen die geladene Menge an Treibstoff nicht für die Fahrt zum nächsten Betankungspunkt ausreicht, werden nicht betrachtet. Dieses Vorgehen wird für alle betrachteten Tankgrößen durchgeführt. Aus allen möglichen Abfolgen wird die Variante mit den geringsten referenzierten Transportkosten nach Formel 7 bestimmt.

Durch dieses Vorgehen kann für die P2CE-Technologie, ausgehend von den preisstigernden Effekten, verursacht durch eine verminderte Lastmitnahme sowie dem Zeitverlust durch zusätzliche Betankung, eine wirtschaftlich optimale Tankgröße bestimmt werden. Des Weiteren kann die Treibstoffbereitstellung auf die Produktionsstandorte nach kostenminimalen Gesichtspunkten verteilt werden.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der beschriebenen Methodik präsentiert. Zunächst werden die Kosten der PtL-Kraftstoffproduktion in den betrachteten Ländern dargestellt. Hierbei wird insbesondere auf die unterschiedlichen Annahmen der Leistungsfähigkeit, der DAC basierten Kraftstoffproduktion sowie auf die Aufschlüsselung der einzelnen Kostentreiber eingegangen. Anschließend werden die errechneten Bedarfe des europäischen Flugverkehrs dargelegt. Neben zeitlich aufgelösten Jahresverläufen werden die Kraftstoffbedarfe räumlich zugeordnet und grafisch dargestellt. Es werden die Ergebnisse der Bedarfsrechnung der Containerschiffe beschrieben. Darauf folgend wird eine Aufschlüsselung der Transportkosten für Containerschiffe in unterschiedlichen Szenarien vorgestellt. Aus diesen Ergebnissen wird ein Ansatz einer Kraftstoffbedarfsdeckung vorgestellt.

4.1 Kraftstoffproduktion

Im Folgenden wird auf Basis der in Kapitel 3.1 definierten Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die für das Jahr 2030 modellierten Produktionskosten von FT-Kraftstoffen für 18 Länder anhand von verschiedenen Szenarien dargelegt. Hierbei ist zu beachten, dass jeder Fall der Kostenberechnung auf einer optimierten Auslegung des Syntheseparks beruht. In Abbildung 20 werden die Kraftstoffgestehungskosten der einzelnen Länder als Boxplot dargestellt.

Die Ergebnisse, dargestellt in Blau und Grau, beziehen sich auf die Kosten für eine auf DAC basierenden Kraftstoffproduktion. In Grün werden die Gestehungskosten für die P2CE-Technologie aufgeführt.

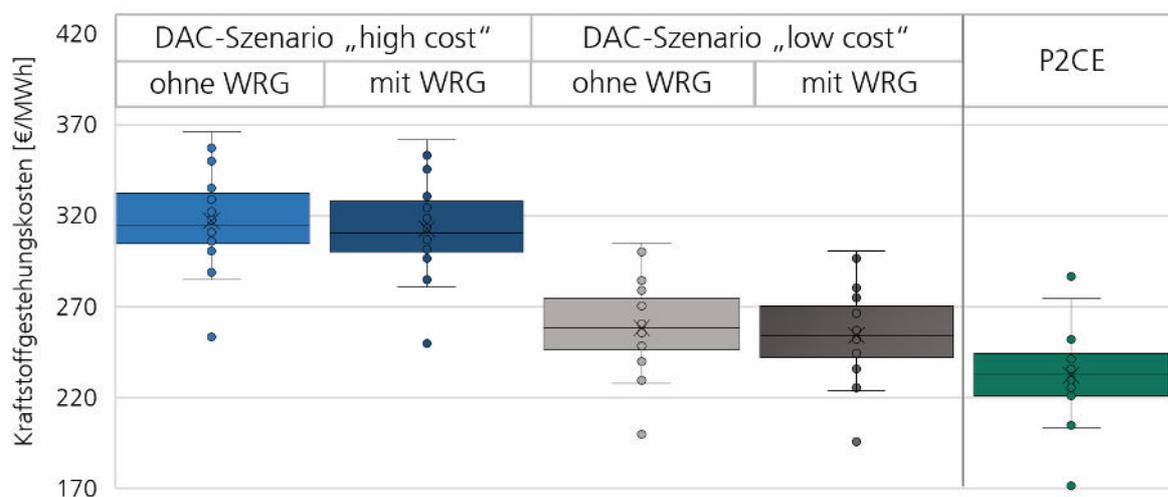


Abbildung 20 – Errechnete Kraftstoffgestehungskosten für DAC-Szenario „high cost“ (Blau), für DAC-Szenario „low cost“ (Grau) und für Betriebsführung nach P2CE-Konzept (Grün), eigene Darstellung

Die jeweils unterschiedlichen Betrachtungsweisen innerhalb der einzelnen Szenarien werden mit und ohne Wärmerückgewinnung (WRG) gegenübergestellt. Hieraus lässt sich der Einfluss der Verwendung der überschüssigen Wärme aus der Synthese für die DAC-Anlagen in Bezug auf den Kraftstoffkosten ableiten.

4.1.1 Kostenverteilung

In Abbildung 21 werden die Einzelposten der Kraftstoffwertschöpfung aufgeführt. Es wird sich auf die Durchschnittswerte der betrachteten Standorte, im DAC-Szenario „low cost“ bezogen, um einen Einblick auf die Kostenintensität der einzelnen Komponenten zu ermöglichen. Es ist zu beachten, dass bei der Auslegung der einzelnen Parks diese Kostenkomponenten variieren können. In der Abbildung 21 ist zu erkennen, dass die Strombereitstellung etwa die Hälfte der Kosten ausmacht. Den anlagenseitigen Anteil der Wasserstoff- sowie Kohlenstoffdioxidbereitstellung durch Elektrolyse und der DAC-Technologie umfassen etwa ein Drittel der Gesamtkosten. Der übrige Anteil, bestehend aus Synthese- Wärmespeicher-, Übertragungs- und Lieferkosten sowie andere Kosten umfasst etwa ein Sechstel. Der Posten „Andere“ umfasst die Wasserstoff- und Batteriespeicher wie auch die Wärmebereitstellung durch Elektrokessel und Großwärmepumpen.

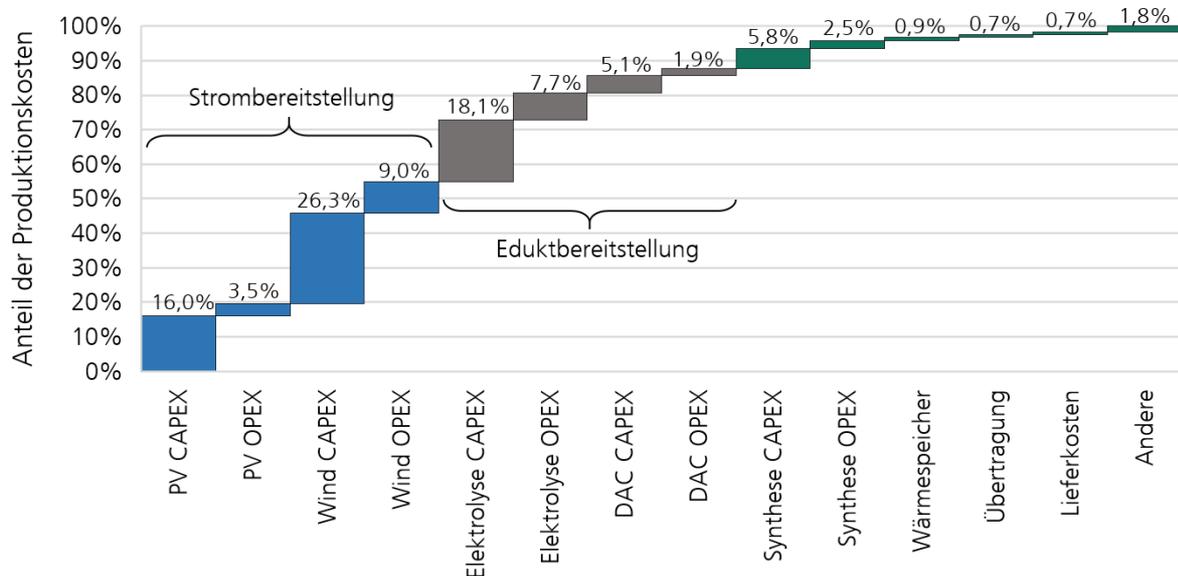


Abbildung 21 – Kostenkomponenten der Produktionskosten des DAC- Szenarios „low cost“, eigene Darstellung

4.1.2 Analyse der CO₂-Bereitstellung durch Direct-Air-Capturing

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben haben regional vorkommende Umweltbedingungen, wie die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit, einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von DAC-Anlagen. Da der Kapitaleinsatz für die CO₂-Gewinnung aus der Luft im direkten

Zusammenhang mit den ortsabhängigen Abscheideraten steht, wird in diesem Abschnitt auf den Effekt der Mehrkosten in der Kraftstoffsynthese eingegangen. Den getroffenen Annahmen aus Kapitel 3.1.3 folgend, wird in Abbildung 22 der errechnete Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Kraftstoffwertschöpfung dargelegt. In der Grafik werden die prozentualen Mehrkosten durch eine korrigierte Leistungsfähigkeit der DAC-Anlagen zu dem Szenario ohne eine Korrektur gegenübergestellt. Es werden für die Szenarien „high cost“ und „low cost“ jeweils die Korrekturfaktoren 1 und 2 abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass der errechnete Einfluss zwischen den Ländern stark abweicht. Die Mehrkosten wirken sich stärker auf das „high cost“-Szenario aus. Zudem kann festgestellt werden, dass der Einfluss durch den Korrekturfaktor 2 stärker ist als durch den Korrekturfaktor 1. Die Standorte sowie die ISO 3-Länderkürzel sind dem Anhang B zu entnehmen.

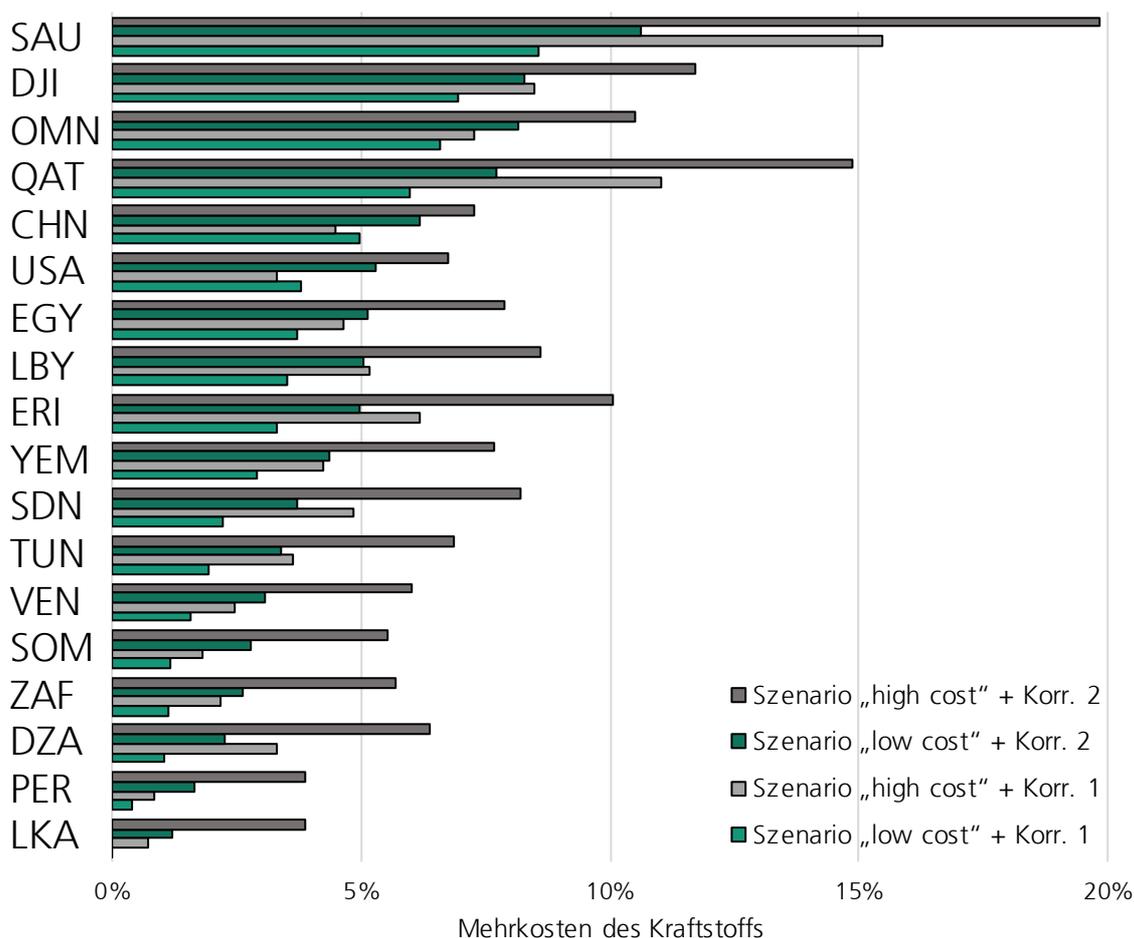


Abbildung 22 – Einfluss von regionalen Umweltbedingungen auf die Treibstoffproduktionskosten in den DAC-Szenarien, eigene Darstellung

Für die betrachteten Länder werden die totalen Kosten der Kraftstofferzeugung auf Basis der DAC-Technologie in Abbildung 23 dargestellt. Die Färbung kennzeichnet das jeweilige

Kostenszenario bei einer Preisspanne von 200 bis 393 €/MWh. Die Karten in der ersten Zeile zeigen die Szenarien „low cost“ und „high cost“. In der zweiten Zeile werden errechnete Kosten der Szenarien unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors 2 dargestellt. Vergleicht man die vertikalen Paarungen, so fällt auf, dass die Kosten unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors 2 höher ausfallen. Durch einen horizontalen Vergleich kann der Einfluss der unterschiedlich angenommen Anlagen- sowie Betriebskosten betrachtet werden.

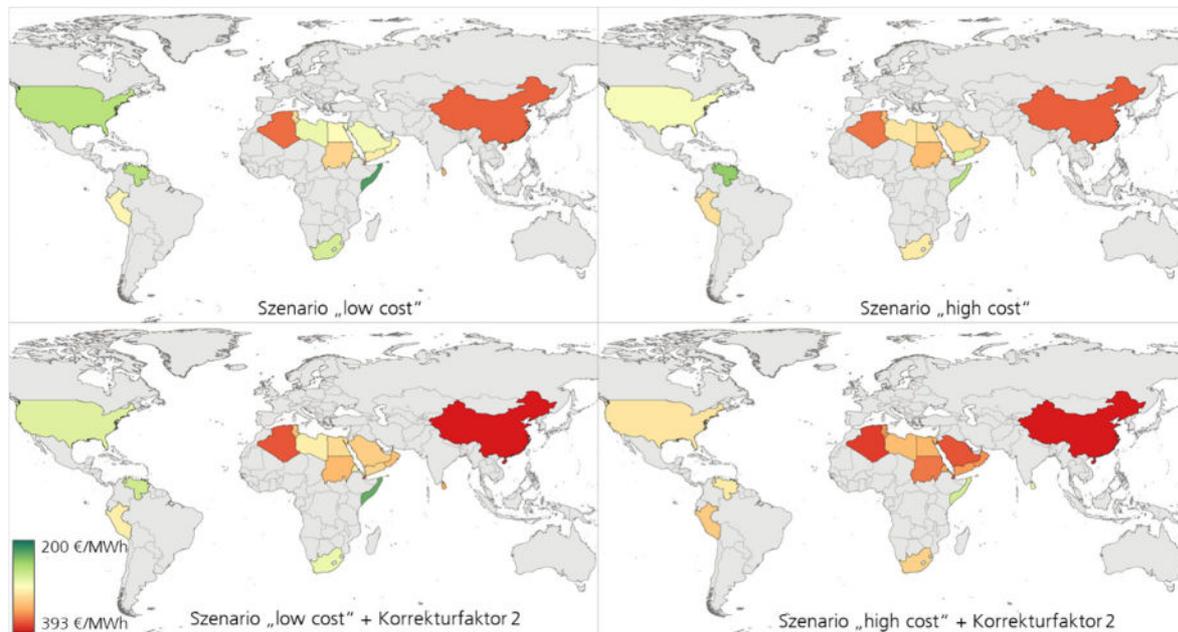


Abbildung 23 – Kraftstoffgestehungskosten der betrachteten Länder, eigene Darstellung

4.2 Kraftstoffbedarfe des europäischen Flugverkehrs

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der Bedarfsrechnung des europäischen Flugverkehrs vorgestellt. Vorab werden die Ergebnisse den realen Bedarfen von sieben deutschen Flughäfen gegenübergestellt. Anschließend wird auf die europäischen Kraftstoffbedarfe im räumlichen sowie zeitlichen Aspekt eingegangen. Darauffolgend wird ein Beispiel für die weiterführende Verwendung erzeugter Teilergebnisse beschrieben.

4.2.1 Flughäfen in Deutschland

Anhand von historisch verbrauchter Jahresmenge an Treibstoff von sieben deutschen Flughäfen, konnten die Berechnungsergebnisse überprüft werden. Hierzu wurden die berechneten Jahresmengen mit den historischen Jahresmengen ins Verhältnis gesetzt. In Abbildung 24 werden als monatlicher Jahresverlauf die berechneten Kerosinbedarfe in Tonnen angegeben. Hierbei ist zu beachten, dass eine Unterbrechung der Y-Achse aufgrund der großen Spannweite der Werte in der Grafik vorzufinden ist. Eine Zuordnung erfolgt hierbei

über den intentional geltenden IATA-Code. In den Daten sind die Verbräuche des Passagierflugverkehrs als auch des Luftfrachtverkehrs enthalten. Die angebenen Prozentzahlen hinter den Flughafen-Codes beschreiben die Abweichung von errechneten zu angefragten Verbrauchswerten aus dem Jahr 2019. Die Gesamtheit der erfassten Werte umfasst etwa 61 % des gesamten Kerosinbedarfs an deutschen Flughäfen.

Im Verlauf der einzelnen Graphen ist eine Saisonalität zu erkennen. Im Vergleich zu den Wintermonaten steigt der Bedarf in den Sommermonaten an den passagierumsatzstarken Flughäfen der Städte Frankfurt, Hamburg Düsseldorf und Berlin um 31-43 %. In den Regionalflughäfen der Städte Münster und Paderborn fällt der saisonale Effekt mit 80 % bzw. 85 % stärker aus.

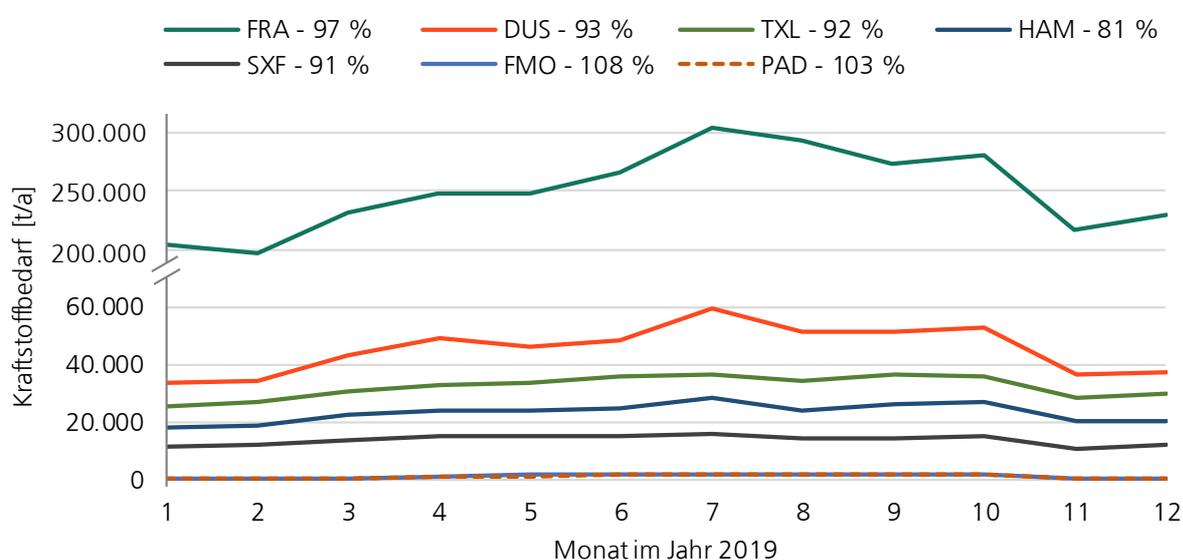


Abbildung 24 – Kraftstoffbedarf von sieben deutschen Flughäfen, eigene Darstellung

4.2.2 Flughäfen in Europa

Im Folgenden werden die berechneten Kraftstoffbedarfe von den europäischen Flughäfen vorgestellt. Es konnten die Verbrauchswerte von insgesamt 32 Ländern aufgeteilt auf 332 Flughäfen identifiziert werden. Ebenfalls werden die Kraftstoffbedarfe für den Passagier- und den Luftfrachtverkehr vorgestellt. Aufgrund fehlender übermittelter Daten konnten keine Verbräuche des EU-Landes Tschechien ermittelt werden. Dementgegen konnten jedoch die Bedarfe für das Vereinigtes Königreich Großbritannien, der Schweiz, Nordmazedonien und Montenegro als nicht EU-Staaten ermittelt werden.

In Abbildung 25 wird der Kraftstoffbedarf von ausgewählten sowie den übrigen Ländern gestapelt dargestellt. Die Zahlen in der Legende geben das Verhältnis aus den errechneten Jahresergebnissen zu veröffentlichten Verbrauchsdaten des Passagierflugverkehrs der einzelnen Nationen wieder. Die historischen jährlichen Verbräuche sind aus CO₂-Emissionen abgeleitete

Kraftstoffmengen [129]. Der errechnete Gesamtbedarf weicht 6 % vom Realverbrauch ab. Bedingt durch die Saisonalität im Flugverkehr konnte innerhalb der betrachteten europäischen Länder eine maximale Bedarfsabweichung zwischen Februar und Juli von 42 % festgestellt werden.

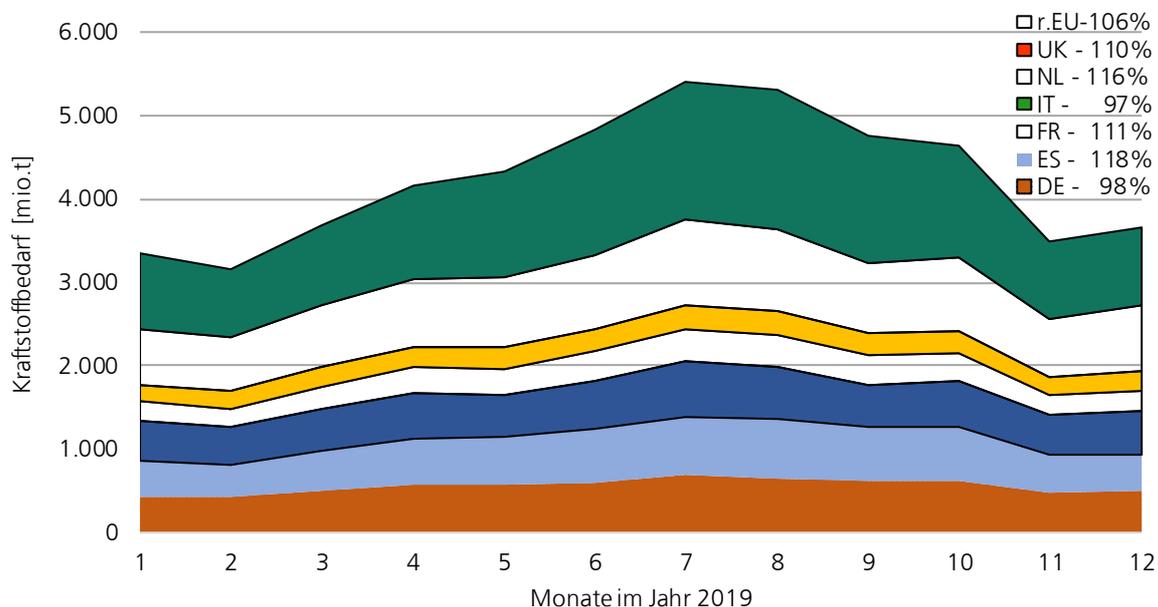


Abbildung 25 – Kraftstoffbedarf ausgewählter europäischer Länder und europäischer Gesamtbedarf, eigene Darstellung

In Abbildung 26 werden den 332 Flughäfen die jeweiligen Jahresbedarfe zugeordnet und eine Gewichtung nach Einzelstaaten dargestellt. Es ist durch die Färbung der Landesfläche zu erkennen, dass das Vereinigte Königreich (UK), Deutschland (DE), Frankreich (FR) und Spanien (ES) die größten nationalen Bedarfe aufweisen. Italien (IT) bzw. die Niederlande (NL) konnten als fünft- bzw. sechstgrößter Verbraucher von Flugtreibstoff identifiziert werden. Die restlichen Staaten (r.EU) werden in der grünen Fläche zusammengefasst. Das geringste Flugaufkommen ist in den Ländern Estland, Montenegro und Slowenien zu finden.

Die Größe der orangenen Punkte gibt die Bedarfe der einzelnen Flughäfen wieder. *London Heathrow, Paris-Charles-de-Gaulle und Frankfurt/Main* stellen absteigend in dieser Kategorie die größten Verbraucher dar. Es ist zu erkennen, dass viele vereinzelte Regionalflughäfen identifiziert werden konnte. Bemessen nach der Anzahl verbrauchen 77 % der Flughäfen unter 0,01 Mio.t Kerosin pro Jahr. Diese Kerosinmenge entspricht in etwa drei Prozent des jährlichen Bedarfes des *Frankfurt/Main Airports*.

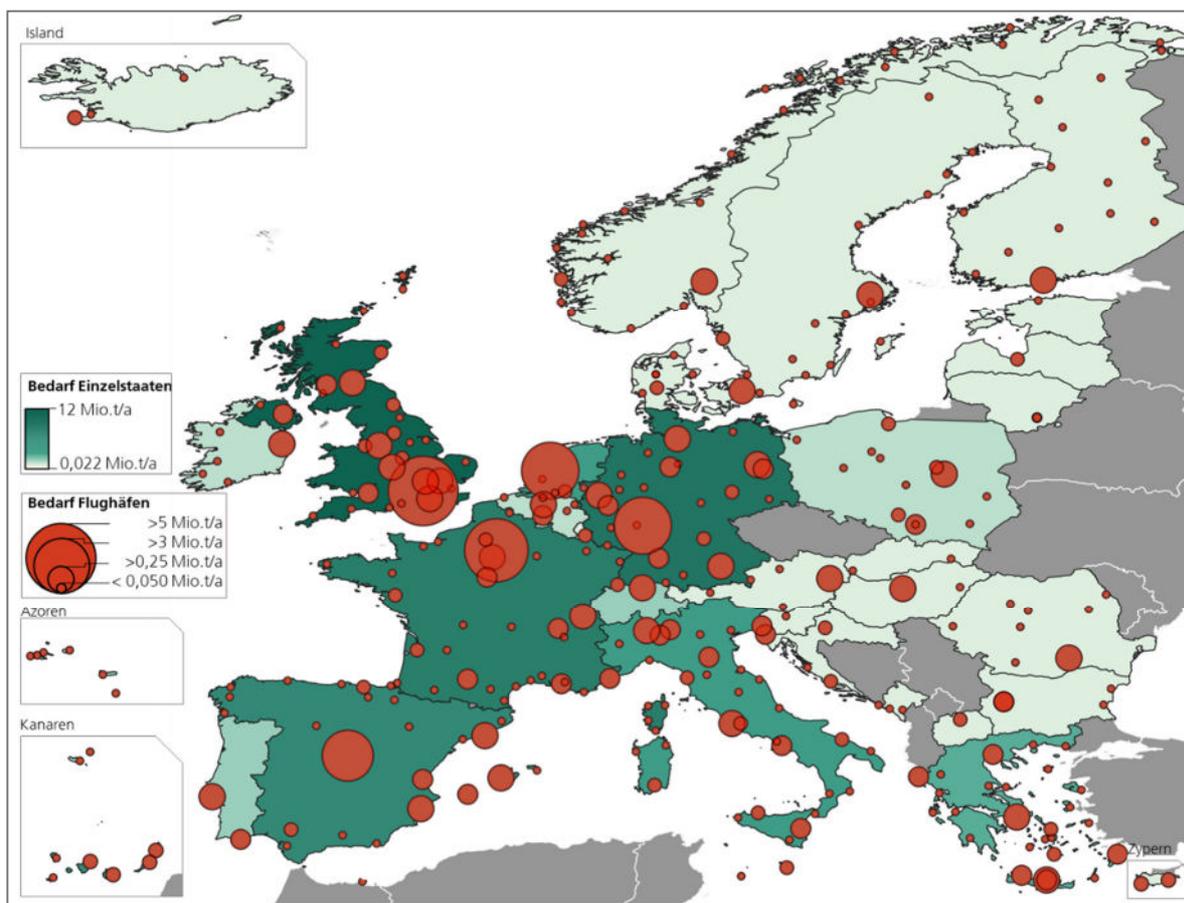


Abbildung 26 – Errechnete Jahreskraftstoffbedarfe europäischer Flughäfen (orange Punkte) und Einzelstaaten (grüne gradiale Färbung), eigene Darstellung

4.2.3 Kraftstoffbedarfe der Entfernungsintervalle

Aus den generierten Daten können verschiedene Betrachtungsansätze abgeleitet werden. In Abbildung 27 und Abbildung 28 werden die Jahresverbräuche auf die Längen der beflogenen Routen als Entfernungsintervall bezogen. Betrachtet werden die gesamten Bedarfe der Länder, aufgeteilt in Passagier- und Luftfrachtverkehr. Zum einen wird die Summe in den einzelnen Intervallen, dargestellt in grünen Balken, als auch die Verteilung dargestellt. Beim Passagierflugverkehr ist zu erkennen, dass auf Kurzstrecken unter 1.500 km etwa 30 % der gesamten Treibstoffbedarfe entstehen. Der Verlauf zwischen 4.500 km bis 10.000 km kann als Plateau mit circa 2 Mio.T/a angesehen werden. Der europäische Gesamtbedarf der identifizierten Flughäfen beläuft sich auf 52.7 Mio.t/a Treibstoff im Passagierluftverkehr.

Ergebnisse

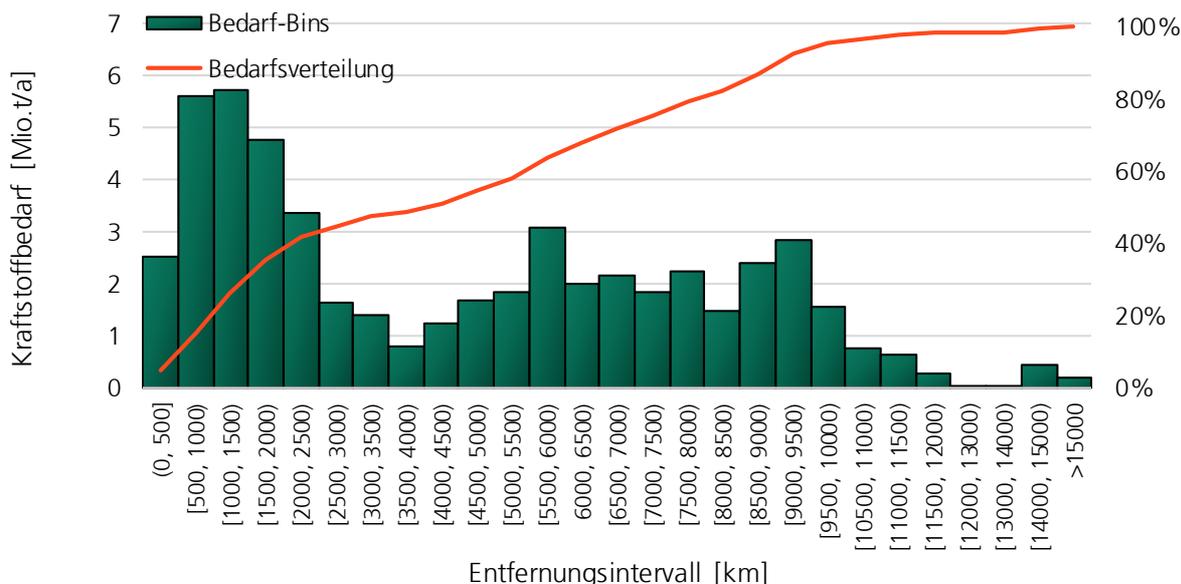


Abbildung 27 – Aufteilung der Treibstoffbedarfe des Passagierflugverkehrs nach Entfernungsintervallen, eigene Darstellung

Im Bereich der Luftfracht verteilen sich die Bedarfe auf eine andere Art als im Passagierverkehr. Auf Entfernungen von bis zu 4.000 km entfallen nur etwa 10 % der gesamten Treibstoffmenge. Zwischen 5.000 km bis 10.000 km kann ein Plateau mit circa 0,5 Mio.t/a festgestellt werden, mit Ausnahme des Maximums zwischen 8.500 km und 9.500 km. Dem Luftfrachtverkehr konnten insgesamt 8.16 Mio.t/a Treibstoff zugeordnet werden. Dies entspricht etwa 15 % des Bedarfs im Passagierflugverkehr.

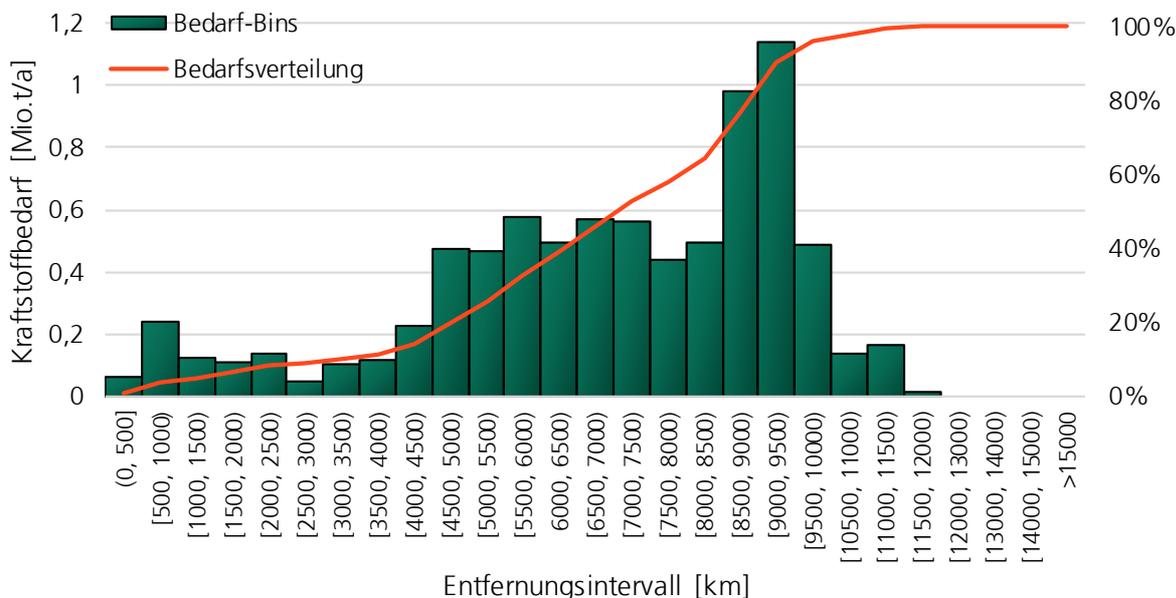


Abbildung 28 – Aufteilung der Treibstoffbedarfe des Frachtluftverkehrs nach Entfernungsintervallen, eigene Darstellung

4.3 Kraftstoffbedarfe und Transportkosten in der Containerschifffahrt

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Bedarfsidentifikation der untersuchten Containerschiffe vorgestellt. Des Weiteren wird für die 362 Schiffe eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, wodurch es möglich ist den Einfluss der Treibstoffkosten auf referenzierte Transportkosten aufzuschlüsseln. Es wird anhand eines für die P2CE-Technologie wirtschaftlich optimierten Fahrplans die Verteilung der Betankungsmengen an den untersuchten Produktionsstandorten ermittelt. Dementgegen werden die Kosten von Containerschiffen, welche Treibstoff auf Basis der DAC-Technologie verwenden entgegengestellt. Abschließend wird anhand einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss der DAC-Investitionskosten auf die Transportkosten dargestellt.

4.3.1 Geographische Zuordnung der Kraftstoffbedarfe

Durch die Analyse der untersuchten Schiffsrouten sowie der Zuordnung der jeweils anfallenden Energiebedarfe durch die Containerschiffe konnten Energiemengen den jeweiligen Teilstrecken zugeordnet werden. In Abbildung 29 ist der geografische Ausschnitt Europas dargestellt. Zu sehen ist der kumulierte Energiebedarf der Einzelstrecken zu den Häfen im Mittelmeerraum. Im Anhang G befindet sich ein weltweiter Kartenausschnitt aller identifizierten Verbrauchswerte mit geografischer Zuordnung.

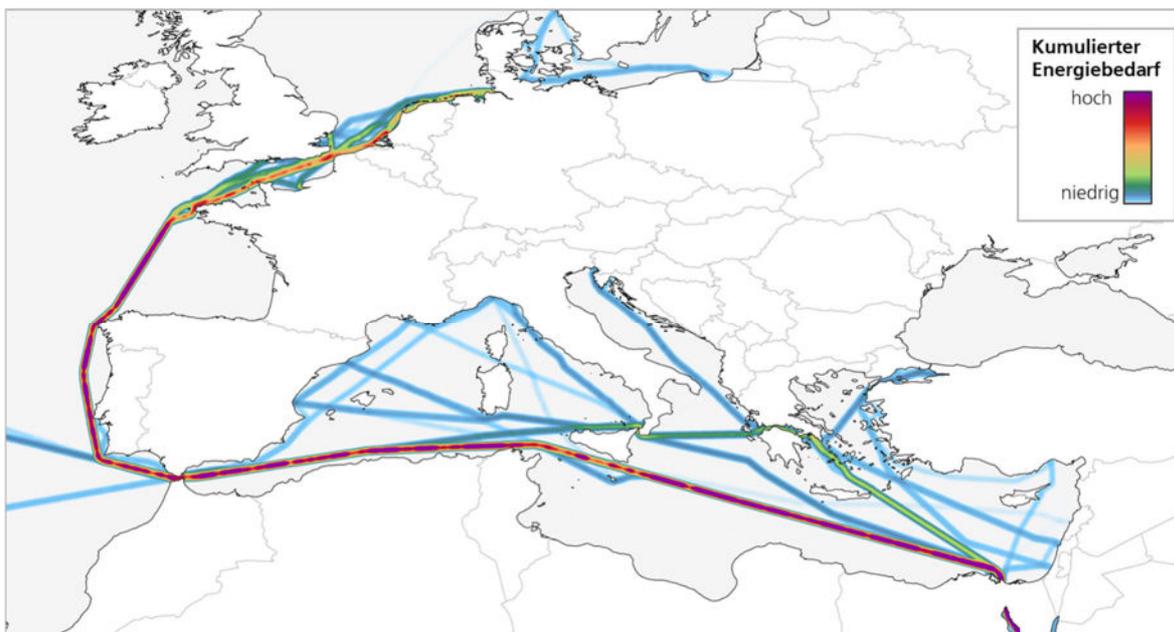


Abbildung 29 – Kumulierter Energiebedarf von identifizierten Containerschiffen auf Routen, eigene Darstellung
Ausgehend von den 362 identifizierten Schiffen konnte ein Gesamtbedarf von 14,02 Mio. t Treibstoff identifiziert werden.

4.3.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Abschnitt wird auf die Ergebnisse der Berechnung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Containerschiffe eingegangen. Insgesamt werden zehn bzw. zwölf einzelne Kostenkomponenten berechnet.

In Abbildung 30 ist die durchschnittliche Kostenverteilung von drei unterschiedlichen Betriebsarten dargestellt. Links wird die Verteilung der konventionell betriebenen Containerschiffe, ausgehend von Treibstoffkosten von 650 €/t aus dem Jahr 2019 gezeigt [130]. In der Mitte wird die der CO₂-neutral betriebenen Containerschiffe dargestellt, welche Treibstoff auf Basis des Kohlenstoffs aus der DAC-Technologie beziehen. Hierbei wird das DAC „high cost“-Szenario abgebildet. Auf der rechten Seite wird die Verteilung der Kosten mit dem P2CE-Verfahren dargestellt.

Die Abbildung zeigt, dass im konventionellen Betrieb mit MDO die Treibstoffkosten etwa ein Viertel der Gesamtkosten ausmachen. Dementgegen entfallen im DAC-Szenario etwa zwei Drittel der Gesamtkosten auf die Treibstoffkosten, bedingt durch die hohen Kosten der DAC-Technologie. Im P2CE-Verfahren entfällt etwa die Hälfte der Kosten auf den Treibstoff. Hier ist allerdings zu beachten, dass die Investitions- sowie Betriebskosten der P2CE-Technologie als zwei weitere Posten (blau und hellblau) im Diagramm Berücksichtigung finden.

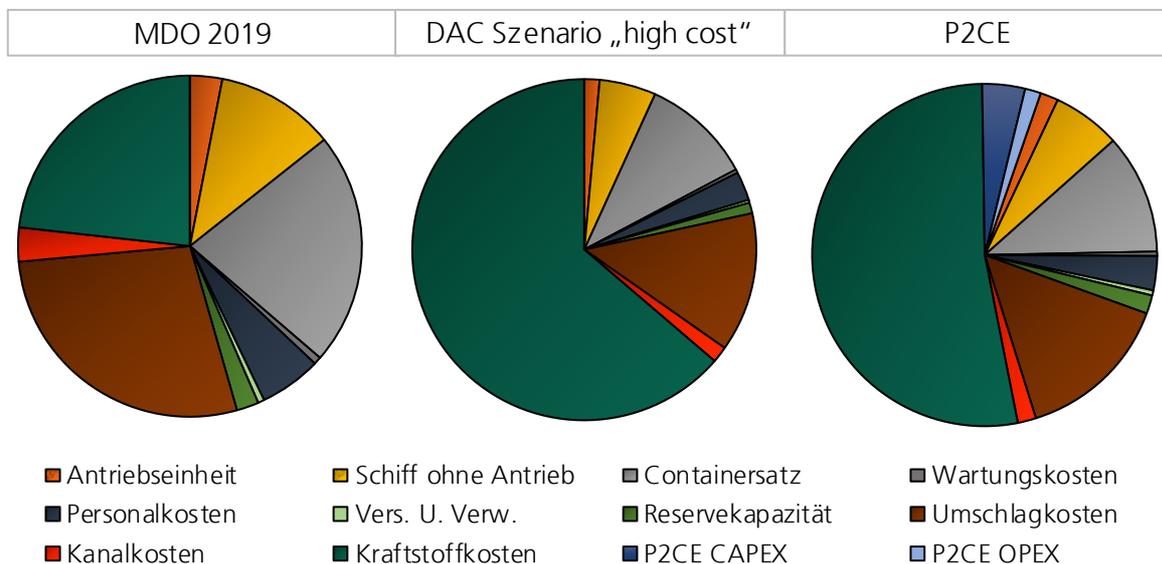


Abbildung 30 – Durchschnittliche Kostenverteilung in der Containerschiffahrt, eigene Darstellung

Wird die Wirtschaftlichkeit von allen betrachteten Containerschiffen mit den angenommenen Kosten aus den Szenarien berechnet, kann auf die zu erwartenden Transportkosten geschlossen werden. In Abbildung 31 werden die Kosten pro transportierter Einheit in TEU, bezogen auf die Referenzstrecke von 22.000 km, für die verschiedenen Szenarien dargestellt.

Für die DAC-Szenarien wird für die Treibstoffkosten der Mittelwert der Produktionskosten aus den 18 betrachteten Standorten verwendet. Die Treibstoffkosten für die P2CE-Technologie ergeben sich nach den individuellen Bezugskosten infolge der Routenoptimierung, beschrieben in Kapitel 3.3.4.3. Des Weiteren wurden die Mehrkosten durch verringerte Lastmitnahme sowie der Zeitverlust durch den Betankungsvorgang berücksichtigt. Die Transportkosten werden als Kosten pro TEU auf der Referenzstrecke dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass sich innerhalb der DAC-Szenarien und unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren gemäß Kapitel 3.1.3 ein aufsteigender Trend zeigt. Durch eine Erhöhung der Treibstoffkosten wirkt sich dies im „high cost“-Szenario mit 2,9 % bzw. 5,1 % auf die Gesamtwirtschaftlichkeit aus. Für das „low cost“-Szenario verursacht die Berücksichtigung der Korrekturfaktoren eine Steigerung der Gesamtkosten von 2,1 % bzw. 3,1 %. Die errechneten Transportkosten für das P2CE-Szenario liegen zwischen den Kosten der DAC-Szenarien „high cost“ und „low cost“. Zum Vergleich der Kosten aus Abbildung 31 werden für die Transportkosten bei einem konventionellen Bezug von fossilen MDO ein Durchschnittswert von 732 €/TEU_{ref} errechnet.

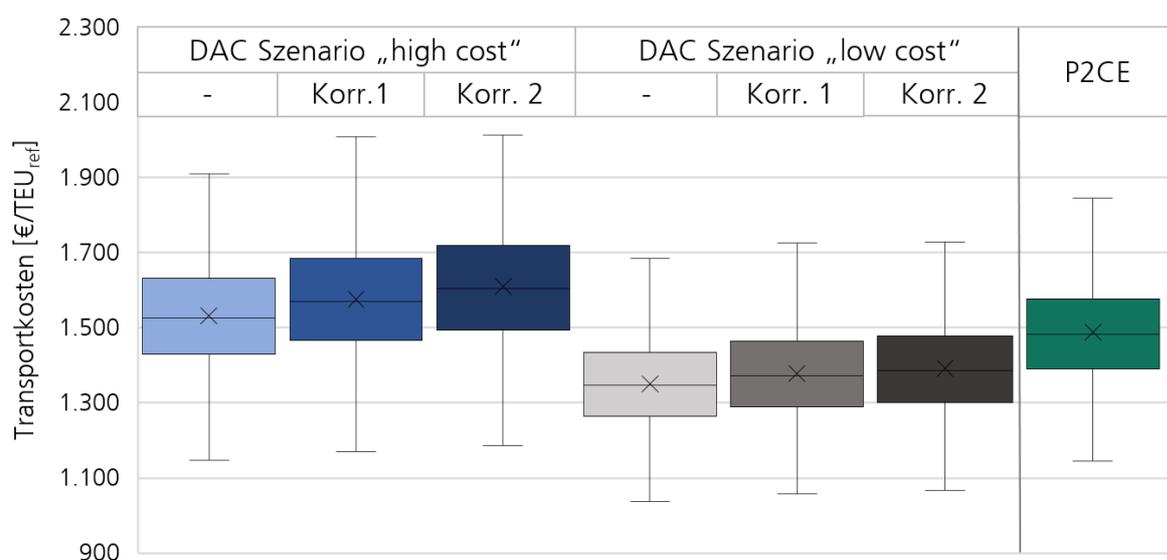


Abbildung 31 – Transportkosten unterschiedlicher Szenarien, eigene Darstellung

Um den Einfluss der unterschiedlichen Kostenannahmen der DAC-Technologie zu verdeutlichen, wird eine Sensitivitätsanalyse der Transportkosten unter Variierung der DAC-Investitionskosten durchgeführt. In Abbildung 32 werden die durchschnittlichen Transportkosten je TEU_{ref} abgebildet. Die X-Achse variiert die Investitionskosten der DAC-Technologie. In Grün werden die Kosten der DAC-unabhängigen P2CE-Technologie wiedergegeben. Die Dreiecke auf den Grafen der DAC-Szenarien spiegeln die Kosten aus Abbildung 31 unter den getroffenen Annahmen aus Tabelle 5 wieder. Die vertikalen Differenzen der Szenarien lassen sich durch die im Betrieb anfallenden Wärme- und

Strombezugskosten begründen. Es ist zu erkennen, dass die Steigungen der Graphen der DAC-Szenarios „low cost“ größer als die der Szenarios „high cost“ ausfallen. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass unter Einfluss der Korrekturfaktoren eine größere Steigung als in den Basisszenarien vorliegt.

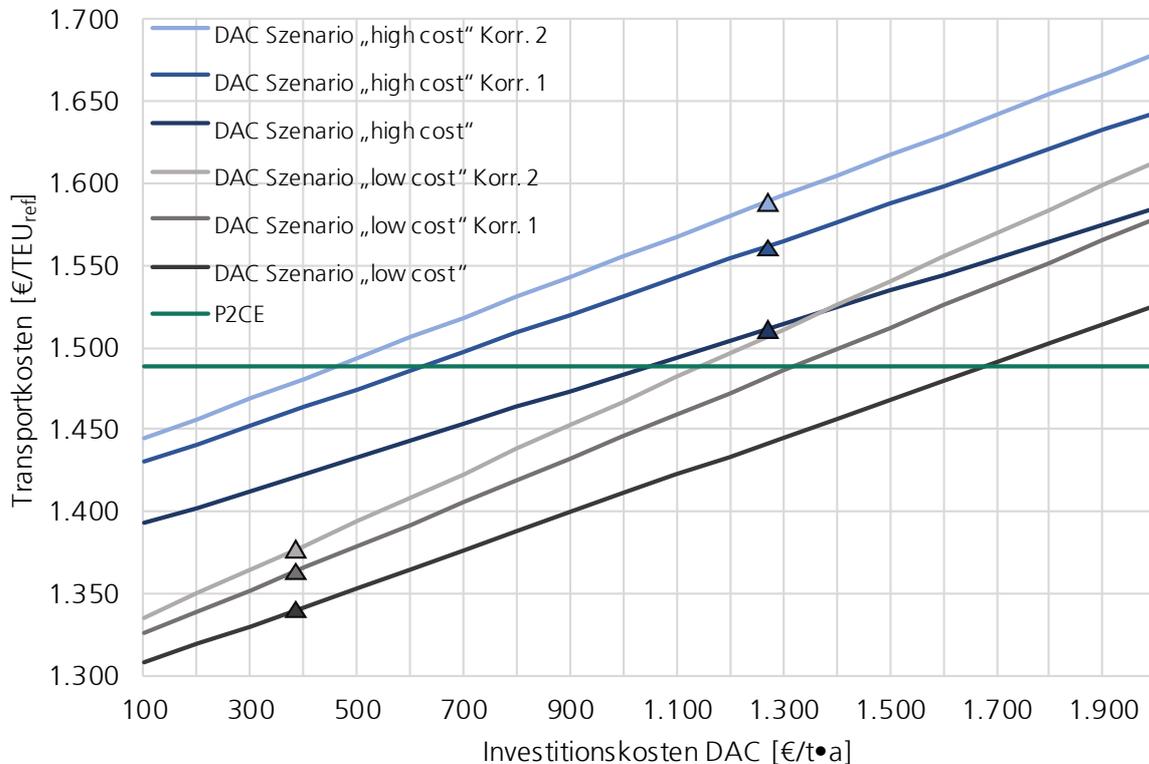


Abbildung 32 – Sensitivitätsanalyse der Transportkosten unter Variation der DAC-Investitionskosten, eigene Darstellung

4.3.3 Verteilung der Kraftstoffproduktion

In Abbildung 33 werden die errechneten Kraftstoffproduktionsmengen für das Szenario basierend auf der P2CE-Technologie den einzelnen Ländern zugeordnet. Als rote Punkte werden die angenommenen Produktionsstandorte in den Ländern dargestellt. Diese dienen ebenfalls als Betankungspunkte für die Containerschiffe. Des Weiteren kann die Verkehrslast der einzelnen Streckenabschnitte eingesehen werden.

Die in der Grafik abgebildete Verteilung basiert auf der Annahme einer wirtschaftlich optimierten Betriebsführung der Containerschiffe. Wie in Kapitel 3.3.4.3 beschrieben, wird hierzu mit Hilfe eines Permutationsmodells unter allen möglichen Betankungsabfolgen, die mit den jeweils geringsten Kosten ausgewählt und die sich hieraus ergebenden Treibstoffbedarfe den einzelnen Standorten zugeordnet. Aufgrund von marktwirtschaftlichen nicht absehbaren Gegebenheiten kann eine derartige Zuordnung für die DAC-Szenarien nicht durchgeführt werden.

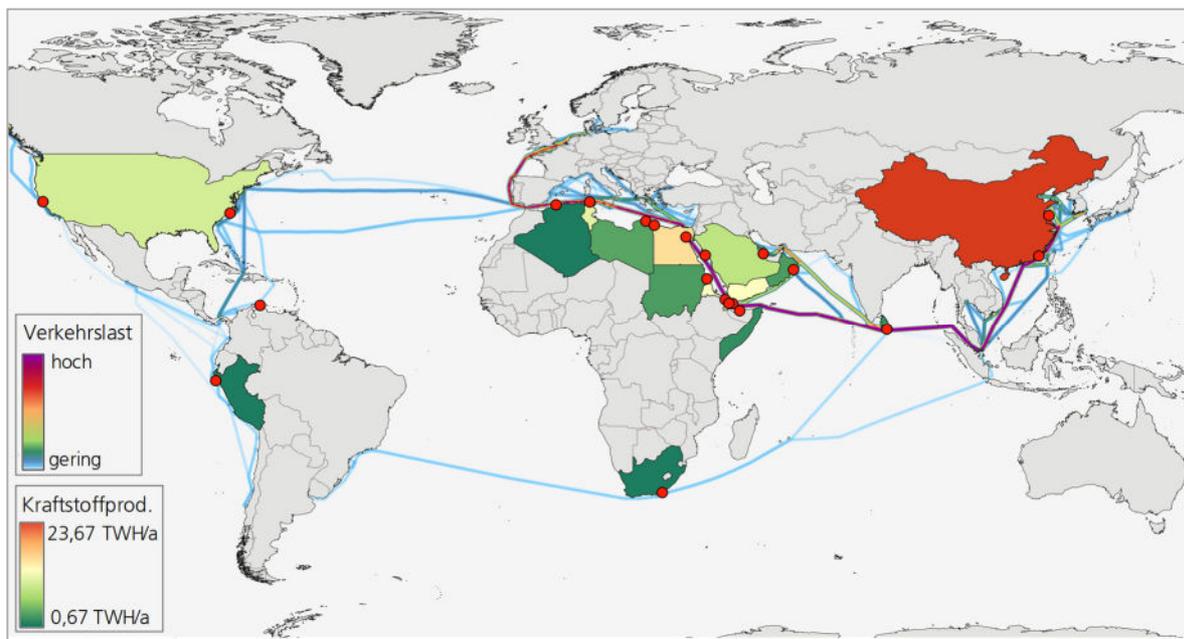


Abbildung 33 – Zugeordnete Kraftstoffproduktionsmengen des P2CE-Szenarios, eigene Darstellung

5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Berechnungsergebnisse aus Kapitel 4 diskutiert. Als erstes werden die berechneten Kosten der Kraftstoffproduktion für das Jahr 2030 betrachtet. Hierbei wird insbesondere auf die Bereitstellung von CO₂ durch die DAC-Technologie unter Berücksichtigung von Umweltbedingungen eingegangen. Anschließend wird auf die Ergebnisse der Kraftstoffbedarfsberechnung für den europäischen Passagier- und Frachtluftverkehr sowie auf die Validität der Berechnungsmethode eingegangen. Des Weiteren wird die Verteilung der globalen Treibstoffbedarfe der betrachteten Containerschiffe über 10.000 TEU diskutiert. Abschließend werden die Ergebnisse aus der Zusammenführung der Kraftstoffbedarfe und Kosten in der Wirtschaftlichkeitsberechnung der unterschiedlichen Technologie-Szenarien miteinander verglichen.

5.1 Kraftstoffproduktion

Im Kapitel 4.1 werden die errechneten Bandbreiten der Produktionskosten für 18 Standorte vorgestellt. In den DAC-Szenarien werden die Ergebnisse mit und ohne Wärmerückgewinnung sowie die Kraftstoffkosten für die P2CE-Technologie vorgestellt.

Um eine Einordnung der Berechnungsergebnisse vornehmen zu können, werden vorab die aktuellen fossilen Kosten für den verwendeten Kraftstoff im Containerschiffsverkehr vorgestellt. Fossiler Kraftstoff kostet 650 €/t (MDO) und entspricht in Bezug auf die Energiemenge etwa 55,1 €/MWh. Die Kosten der synthetischen Kraftstoffe übersteigen diese um ein Vielfaches. Im Fall des DAC-Szenarios „low cost“ ohne WRG übersteigen die errechneten Treibstoffkosten den Preis des MDO um das 4,7-fache. Im Fall des DAC-Szenarios „high cost“ ohne WRG werden wird der Preis um das 5,8-fache überschritten. Vergleicht man die Ergebnisse mit den Kosten der Studie des Analyse- und Beratungsunternehmen *Prognos AG* aus dem Jahr 2019, so kann eine Ähnlichkeit der Preisniveaus festgestellt werden. Hierin werden die PtL-Kosten für das Jahr 2030 mit 329 €/MWh angegeben [97]. Im „high cost“-Szenario werden Kosten von 253-366 €/MWh, mit einem Durchschnitt von 316 €/MWh errechnet. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Kostenannahmen für die DAC-Anlagen des „high cost“-Szenarios aus der oben genannten Studie entstammen. Im Vergleich hierzu wird in anderen wissenschaftlichen Quellen von PtL-Produktionskosten von 110-190 €/MWh oder 145 €/MWh ausgegangen. Grund für die niedrigeren Preise sind optimistischere Annahmen der Investitionskosten für die Anlagentechnik sowie geringer angenommene Kapitalkosten.

Anlagen mit einer WRG können für den Regenerationsschritt der DAC-Anlage die überschüssige Wärme der Kraftstoffsynthese nutzen. Es ist zu erkennen, dass sich der Einfluss der Wärmerückgewinnung mit durchschnittlich 1,3 % für das „high cost“-Szenario, bzw. 1,6 % für das „low cost“-Szenario, gering auf die Gesamtkosten auswirkt.

Für die Bereitstellung von Kohlenstoffdioxid für die Produktion des Kraftstoffs für den europäischen Flugverkehr müssen 21.295 Einheiten der DAC-Anlagen in der Größe der Pilotanlage der Firma *Climeworks AG* realisiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass keine Produktionsminderungen durch Umweltbedingungen berücksichtigt sind. Bedingt durch die CO₂-Abreicherung der Umgebungsluft würde ein effizienter Betrieb an einem Standort nicht realisiert werden können.

Im Vergleich sind die Produktionskosten des DAC-Szenario „high cost“ um 18,5 % ohne WRG, bzw. 18,7 % mit WRG teurer als die des „low cost“-Szenarios. Diese große Diskrepanz ist auf die unterschiedlichen Annahmen der Investitionskosten und die Energiebedarfe zurückzuführen. Daher besteht ein großer Forschungsbedarf bezüglich der anzunehmenden Lernraten und Effizienzgewinne, um realistische Kosten für das Jahr 2030 abzuleiten.

Für die Bereitstellung nach dem P2CE-Verfahren können im Vergleich zum DAC-Szenario „low cost“ mit WRG, durchschnittlich etwa 11 % geringere Kosten festgestellt werden. Zwar entfällt bei dieser Technologie die DAC-Bereitstellung über externe Quellen, jedoch fallen Kosten für die Sauerstoffverflüssigung an. Diese belaufen sich bei Verwendung der P2CE-Technologie auf durchschnittlich 4,2 % der Treibstoffkosten. Diese Kostenkomponente setzt sich aus zwei Dritteln Betriebs- und einem Drittel Anlagenkosten zusammen.

Durch die Kraftwerksparkoptimierung, beschrieben in Kapitel 3.1.1 konnte eine wirtschaftlich sinnvolle Auslegung der Einzelkomponenten für die getroffenen Kostenannahmen erreicht werden. In Abbildung 21 wird die Aufteilung der Kosten für das DAC-Szenario „low cost“ dargestellt. Es wird gezeigt, dass der Stromproduktion mehr als die Hälfte der Kraftstoffproduktionskosten zugeordnet werden kann. Hierdurch wird ersichtlich, dass die EE-Ressourcen am Produktionsstandort einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Produktionsparks haben.

In Abbildung 22 werden die Mehrkosten der Kraftstoffproduktion durch den Einfluss von Umweltbedingungen auf die DAC-Anlagen dargestellt. Die aufgrund einer Minderung der Leistungsfähigkeit der DAC-Anlagen anfallenden Mehrkosten sind in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Aus diesem Grund muss eine größere Anzahl von CO₂-Abscheideeinrichtungen errichtet werden, was wiederum zu einer Erhöhung der Investitionskosten führt. Für die

getroffenen Annahmen wird ersichtlich, dass der Einfluss auf die Kraftstoffkosten in Abhängigkeit der Region stark variieren kann. In den als Referenz verwendeten systemanalytischen Studien, findet dieser Effekt keine Berücksichtigung [6, 8, 53, 106], obwohl den Anlagenherstellern diese Problematik bekannt ist [54]. An dieser Stelle ist wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben zu erwähnen, dass die für die Analyse verwendeten Adsorptionscharakteristika aus einer Studie entnommen sind, welche sich auf die des Adsorptionsmittels der Firma *Hydrocell Ltd.* bezieht. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurden Annahmen der Firma *Climeworks AG* verwendet.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Literatur nur wenige Informationen über die Abscheidecharakteristika der verwendeten Adsorptionsmittel zu finden sind. Produzenten von DAC-Anlagen geben nur wenige technischen Details öffentlich bekannt. Auf Anfrage bei der Firma *Climeworks AG* wurde bestätigt, dass keine detaillierten Informationen zu dem firmeneigenen Filtermaterial bereitgestellt werden können [131].

Die Ergebnisse dieser Masterarbeit sollen darauf hinweisen, dass für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von DAC-Anlagen reale Umweltbedingungen berücksichtigt werden sollten. Hierzu wurde ein Ansatz einer Methodik entwickelt, welche die Leistungsfähigkeit von DAC-Anlagen durch die Bereitstellung von genaueren Informationen zu den verwendeten Filtermaterialien durch die Produktionsfirmen abbilden kann.

5.2 Kraftstoffbedarfe des europäischen Flugverkehrs

Die Berechnung der Kraftstoffbedarfe des europäischen Flugverkehrs, basieren auf der Methodik aus Kapitel 3.2.2. Mit dieser Verfahrensweise können aus öffentlich zugänglichen Daten, detaillierte Verbrauchswerte für den Großteil der europäischen Flughäfen erzeugt werden.

Für den deutschen Luftverkehr konnten durch die Angaben von sieben Flughafenbetreibern die Berechnungsergebnisse überprüft werden. Es konnte ausgehend von den sieben Flughäfen eine, nach der Treibstoffmenge gewichteten Übereinstimmung von durchschnittlich 95 % errechnet werden. Vergleicht man die Ergebnisse mit den durch den Passagierflugverkehr emittierten CO₂-Emissionen aller betrachteten Länder, beträgt die Abweichung lediglich 6 % [4].

Aktuelle Flugverkehrsprognosen orientieren sich an prozentualen Wachstumsraten historischer RPK, welche sich aus der Multiplikation der Passagieranzahl mit der zurückgelegten Strecke ergeben. Durch die entwickelte Methodik wird es ermöglicht, für Prognosen Wachstumsraten

einzelner in Verbindung stehender Regionen, zu differenzieren. Wird beispielsweise eine Steigerung des Bedarfes an Passagiertransporten zwischen Europa und Australien von 10 % erwartet, so können die Auswirkungen direkt berechnet werden. Somit können Auswirkungen mittels differenzierter Entwicklungsannahmen genauer abgeleitet werden. Durch eine genaue Zuordnung der Bedarfe in Verbindung mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.2, können die Auswirkungen von CO₂-Minderungszielen bei gleichbleibender Flugleistung auf die Transportdienstleistung abgeleitet werden.

In Kapitel 4.2.3 werden die Treibstoffbedarfe des europäischen Passagier- und Frachtflugverkehrs nach Entfernungsintervallen aufgeteilt. Als Beispiel kann an dieser Stelle angeführt werden, dass ausgehend von Europa etwa 15 % des verwendeten Kraftstoffs auf Flugstrecken mit weniger als 1.000 km zurückzuführen ist. Aus den Ergebnissen können beispielsweise die CO₂-Minderungseffekte bei Flugverboten unter festgelegten Mindeststrecken abgeleitet werden.

5.3 Kraftstoffbedarfe und Transportkosten in der Containerschifffahrt

Aus öffentlich zugänglichen Schifffahrtsplänen von Reedereien sowie Daten aus der Literatur, konnte die für den Betrieb notwendige Kraftstoffmengen für 362 Containerschiffe über 10.000 TEU identifiziert werden. Mit einer Beladungsmenge der analysierten Schiffe von 5,3 Mio. TEU werden 23,2 % der weltweiten Kapazität der Containerschiffsflotte abgedeckt [132]. Aus den berechneten Verbrauchsdaten wurde die Wirtschaftlichkeit von den betrachteten Containerschiffen für einen Szenarienvergleich abgeleitet.

In Kapitel 4.3 wurde eine Methodik entwickelt, Verbrauchswerte von Containerschiffen ohne kostenpflichtige Daten von Betreiberfirmen von AIS-Verzeichnissen wie *Fleetmon* oder *MarineTraffic* zu erzeugen. Für die Bereitstellung von zeitlich aufgelösten Positionsdaten von 300 Schiffen für 6 Monate wird von der Firma *Fleetmon* ein Preis von 5.000 € berechnet [112]. Diese Daten werden in einer Auflösung von 30 Minuten bereitgestellt. Durch die in der Masterarbeit erarbeitete Methode können zum einen zeitlich unbegrenzt Bedarfsdaten bereitgestellt werden. Zum anderen kann das Vorgehen auf andere Schiffskategorien sowie kleine Containerklassen übertragen werden. Die geografische Verteilung der Bedarfe beruht auf dem Ansatz, dass ausgehend von der Zeit zwischen den im dem Fahrplan festgelegten Abfahrts- und Ankunftszeitpunkten die Durchschnittsgeschwindigkeit auf einer Strecke berechnet wird. Aus der Geschwindigkeit wird wiederum der Kraftstoffbedarf berechnet. Hierbei werden jedoch keine Wartezeiten berücksichtigt. Fehler in Zeitplänen können ebenfalls zu Diskrepanzen in der Bedarfsberechnung führen. Des Weiteren kann nicht überprüft werden, ob die Containerschiffe die identifizierten Routen, dargestellt in Abbildung 17 verwenden.

Durch die Berechnungen im Kapitel 4.3.2 konnte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der untersuchten Containerschiffe abgebildet werden. Hierbei wurde die Annahme getroffen, dass der Betrieb im Jahr 2030 dem der untersuchten Schiffe entspricht. In Abbildung 30 wird die Kostenverteilung im DAC-Szenario-„high cost“ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Treibstoffkosten mehr als die Hälfte der Gesamtkosten ausmachen. Dies ist auf die mehr als fünffachen Treibstoffkosten im Vergleich zu einer fossilen Bereitstellung im Jahr 2019 zurückzuführen. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben steigt der Treibstoffbedarf eines Schiffes proportional mit der dritten Potenz, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Daher ist davon auszugehen, dass Reedereien bei einer starken Änderung des Kraftstoffpreises die Geschwindigkeit der Containerschiffe anpassen. Es wird vermutlich ein kostenoptimaler Betrieb angestrebt, welcher sich als Kompromiss aus Kosteneinsparungen durch verminderten Treibstoffverbrauch und Opportunitätskosten durch verminderte Transportleistung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit zusammenfassen lässt.

Für den Betrieb im P2CE-Betrieb kann festgestellt werden, dass in der Kostenverteilung der Anteil der Treibstoffkosten etwa die Hälfte ausmacht. Dies ist auf die verminderten Treibstoffkosten durch eine ausbleibende CO₂-Bereitstellung zurückzuführen. Für die Kraftstoffproduktion ergibt sich ein Vorteil für den Betrieb mit dem P2CE-Verfahren. Die Anlagenmehrkosten auf dem Schiff betragen im Durchschnitt etwa 5,5 % der Transportkosten. Zudem sind die Kosten für die Sauerstoffverflüssigung anteilig in den Treibstoffkosten enthalten. Da es sich um eine Technologie im TRL 2 handelt, unterliegen die Kostenannahmen für die gesamten P2CE-Anlagentechnik einer großen Unsicherheit.

Da diese Schiffe, bedingt durch die zusätzlichen Tankstopps eine verminderte Jahrestransportleistung vorweisen, werden die Gesamtkosten auf weniger transportierte Einheiten aufgeteilt. Da aus den Annahmen der Betankungsstrategie, beschrieben in Kapitel 3.3.4.3, eine Minderung der Transportleistung aus einem rein theoretischen Modell abgeleitet wird, unterliegt dies ebenfalls einer Unsicherheit.

Durch die Optimierung der Tankgröße sind im Gegensatz zu dem standardisiert angenommenen 5.000 t die Transportkosten im Durchschnitt um 6,5 % gesunken. Der Anteil der loss-of-cargo_{space} (LoC_S) konnte von 218,4 auf 138,9 €/TEU_{ref} verringert werden. Im Gegensatz dazu ist der loss-of-cargo_{time} (LoC_T) um lediglich 0,28 % auf 60,1 €/TEU_{ref} gestiegen. Auf den Anteil der Opportunitätskosten entfallen infolge von verringerter Lastmitnahme, bezogen auf die Gesamtkosten demnach durchschnittlich 9,3 %. Der Kostenanteil des zeitlichen Mehraufwands beläuft sich hingegen auf 4,0 %.

Hierdurch wird auf der einen Seite ersichtlich welchen Anteil die verminderte Lastmitnahme, bedingt durch zusätzliche Begleitgastanks, bzw. der Zeitverlust durch zusätzliche Betankungen

verursacht. Auf der anderen Seite wird durch die Optimierung deutlich, dass durch einen minimalen zeitlichen Mehraufwand, durch eine erhöhte Anzahl an Tankstopps, eine Verkleinerung der CO₂/O₂-Tanks wirtschaftlich gerechtfertigt werden kann.

Im Vergleich der Transportkosten in den DAC-Szenarien gegenüber den Kosten für den Betrieb nach dem P2CE-Konzept wird deutlich, dass die wirtschaftlichen Annahmen zur DAC-Technologie ausschlaggebend für die Bestimmung des wirtschaftlichsten Szenarios sind. Der Einfluss der Anpassung der Leistungsfähigkeit der DAC-Anlagen, beschrieben in Kapitel 3.1.3, wird im DAC-Szenario „low cost“ mit einer durchschnittlichen Steigerung der Transportkosten von 3,5 bzw. 5,0 % errechnet. Im DAC-Szenario „high cost“ wird eine Anpassung um 4,4 % bzw. 7,5 % bestimmt. Für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit konnten in diesem Fall alle 362 identifizierten Schiffe berücksichtigt werden. Die berechneten durchschnittlichen Transportkosten der P2CE-Technologie liegen zwischen denen der DAC-Szenarien. In der Optimierung zur Bestimmung der Betankungsorte und -mengen werden bedingt durch in Kapitel 3.3.4.3 beschriebene Rahmenbedingungen einige Schiffe ausgeschlossen. Daher konnten auf Abbildung 31 die Ergebnisse für lediglich 336 Schiffe dargestellt werden.

Ausgehend von den Ergebnissen ist zu erwähnen, dass die Transportkosten im P2CE-Konzept von den Treibstoffkosten der Betankungspunkte abhängen. Im Gegensatz dazu kann der Treibstoff auf Basis von DAC ausschließlich an preiswerten Standorten produziert werden. Daher können in diesem Fall durch die Verlagerung der Treibstoffproduktion an preiswerte Standorte eine Kostenreduktion realisiert werden.

Aus der Sensitivitätsrechnung dargestellt durch Abbildung 32, soll ebenfalls der Einfluss des für die Zukunft angenommenen Preises auf die Transportkosten dargestellt werden. Auf der X-Achse werden die Investitionskosten der zur Kraftstoffproduktion benötigten DAC-Anlagen den Szenarien zugeordnet und variiert. Es ist zu erkennen, dass die Szenarien ohne Korrekturfaktor parallel verlaufen. Dies gilt separat betrachtet ebenfalls für die Szenarien mit Korrekturfaktor 1 und 2. In diesen Fällen ist zu beobachten, dass durch die zunehmende Einflussnahme durch den Korrekturfaktor auf die Investitionskosten, die Steigung der Graphen zunimmt. Aus der Sensitivität kann abgeleitet werden, inwieweit sich Mehrkosten durch zusätzliche Investitionen in die Wartung der DAC-Anlagen einstellen und sich auf die Transportkosten auswirken. Diese können beispielsweise durch die in der Wirtschaftlichkeit nicht betrachteten, jedoch vom Hersteller vorgesehenen Wechsel von Komponenten der Vakuumkammer nach 10.000 Betriebsstunden oder 7 Jahren verursacht werden [133]. In Bezug auf die in den Kraftstoffgestehungskosten zugrundeliegenden Angaben zur

Lebensdauer von 25 Jahren sowie den errechneten Volllaststunden der DAC-Anlagen, müsste dieser Wechsel 17,5 Mal durchgeführt werden.

In Kapitel 4.3.3 wird als Ergebnis die Verteilung der Kraftstoffproduktion auf die Länder mit Betankungsoption nur des P2CE-Szenarios dargestellt. Um die bestimmten Kraftstoffbedarfe aus der Containerschifffahrt auf unterschiedliche Produktionsstandorte zu verteilen müssen Entscheidungskriterien festgelegt werden. Erfolgt die Vergabe der Energiekontingente ausschließlich nach minimalen Kosten, konzentriert sich die gesamte Produktion auf vermutlich einen Standort. Da der Kauf von Treibstoff im konventionellen Betrieb jedoch nach marktwirtschaftlichen Gegebenheiten entschieden wird, erscheint eine solche Annahme zu kurz gegriffen. Aufgrund dieser Tatsache und der mangelnden Informationen zu den Betankungsstrategien aus dem Tagesgeschäft der einzelnen Reeder, kann im Fall der DAC-Szenarien keine Abschätzung der Zuordnung von produzierten Treibstoffmengen getroffen werden. Da ausgehend von der P2CE-Technologie, die Lieferkosten sowie die technische Durchführung der Überführung des Treibstoffes wie auch der Begleitgase größere Hürden darstellen, können hierbei Energiemengen einzelnen Produktionsstandorten zugeordnet werden. Ausschlaggebend für die Verteilung, dargestellt in Abbildung 33, sind neben den Produktionskosten an dem jeweiligen Standort, die Intensität des Verkehrsaufkommens, die Entfernung zu den erreichbaren Routenabschnitten sowie die Entfernung zu in Konkurrenz stehenden Produktionsstätten. Wird ausschließlich der angebotene standortabhängige Kraftstoffpreis mit den bestimmten Bedarfsmengen gegenübergestellt, kann keine Korrelation festgestellt werden.

Es ist zu erkennen, dass für China die größte Treibstoffnachfrage vorgesehen ist. Dies ist auf zwei Gründe zurückzuführen. Zum einen ergibt sich durch die weite Entfernung zu anderen Betankungspunkten eine Alleinstellung, und zum anderen wurden dem Land zwei Betankungspunkte zugeordnet.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Produktionskosten von regenerativem Kraftstoff für das Jahr 2030 berechnet und eine Kraftstoffbedarfsanalyse für den Luft- und Seeverkehrssektor durchgeführt. Außerdem erfolgte ein Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen CO₂-neutralen Antriebstechnologien von Containerschiffen.

Vergleicht man die errechneten PtL-Produktionskosten mit aktuellen Preisen für fossile Kraftstoffe, wird eine Vervielfachung der Treibstoffkosten der abhängigen Sektoren ersichtlich. Hieraus kann abgeleitet werden, dass sich bei tatsächlicher Umstellung auf regenerative Kraftstoffe, die Motivation der Verbrauchssenkung und eine Änderung innerhalb der Betriebsführung von Flugzeugen und Schiffen stark ändern wird. Im Fall der Containerschiffahrt könnte der strategische Trend der Treibstoffkostenreduzierung durch Herabsetzen der Geschwindigkeit noch stärker als bisher umgesetzt werden.

In dieser Masterarbeit wird im Gegensatz zu bisher veröffentlichten systemanalytischen Studien die Leistungsfähigkeit der DAC-Technologie in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen quantifiziert. Dieser neuartige, auf zeitreihenbasierte Analyseansatz der Adsorptionsleistung von DAC-Anlagen, kann für die Auslegung sowie zur Planung der finanziellen Aufwendungen realer Syntheseparks verwendet werden. Es ist zu erwähnen, dass für die Realisierung von industriellen Anlagen noch technische und regulatorische Problemstellungen vorliegen. Hohe Investitionshürden stehen großen Unsicherheiten wie zum Beispiel der CO₂-Bereitstellung gegenüber. Daher können die auf Lernraten basierenden errechneten Produktionskosten als Abschätzung zur Kostentrendentwicklung angesehen werden. Für die Errechnung der P2CE-Treibstoffkosten ist zu erwähnen, dass die Annahmen auf einem theoretischen Konzept basieren. Es kann nicht abgesehen werden, ob die Lagerung, Verwendung und Überführung der berechneten Mengen an flüssigem Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff auf einem Schiff bzw. an einem landseitigen Prozess durchführbar sind. Daher besteht eine erhebliche Unsicherheit für eine reale Umsetzung.

Für den Flugverkehr konnten räumlich und zeitlich aufgelöste Kraftstoffbedarfe berechnet und verifiziert werden. Aus den erzeugten Daten wird ersichtlich, welche Flughäfen und Routen einen großen Einfluss auf die Gesamtheit der Treibstoffbedarfe haben. Mit der auf Passagierzahlen basierenden Methode könnten angenommene Trends im Reiseverkehr für die Prognostizierung von Energiebedarfen verwendet werden. Durch die Quantifizierung der saisonalen Kraftstoffbedarfsschwankungen könnte dieser Einfluss als Parameter in einer Auslegung von Produktionsparks Verwendung finden.

In der Methodik zur Kraftstoffbedarfsrechnung von Containerschiffen über 10.000 TEU konnte eine räumliche Aufteilung der Energiebedarfe auf Routenabschnitte erreicht werden. Hierdurch wird der räumliche Zusammenhang zwischen Bedarfsorten und wirtschaftlich sinnvollen Produktionsorten von regenerativem Kraftstoff verdeutlicht. Diese Methodik kann auf weitere Schiffsklassen und –größen übertragen werden. Es wurde das theoretische Konzept einer Betankung von Containerschiffen direkt am Produktionsort vorgeschlagen. Hierdurch würden aufwendige Lieferkosten sowie das Handling des Kraftstoffes an Häfen entfallen. Dieses Konzept ermöglicht der P2CE-Technologie einen Vorteil, da das auf dem Schiff erzeugte Kohlenstoffdioxid ohne zusätzlichen Lieferweg der Synthesstätte übergeben wird. Zudem kann der durch die Kraftstoffproduktion anfallende Sauerstoff direkt Verwendung finden.

Der wirtschaftliche Vergleich der CO₂-neutralen Betriebsführungen von Containerschiffen auf Basis von DAC und dem P2CE-Konzept konnte keine Überlegenheit einer Technologie darlegen. Prognostizierte Annahmen zu Investitionskosten der DAC-Anlagen haben einen starken Einfluss auf die referenzierten Transportkosten. Ebenfalls besteht durch den frühen Entwicklungsstatus der P2CE-Technologie eine hohe Unsicherheit in Bezug auf die errechneten Transportkosten.

In dem Modell zur Berechnung der P2CE-Transportkosten werden unterschiedliche Betankungsszenarien für die minimalen Transportkosten untersucht. Es werden der Zeitverlust sowie die Minderung der maximalen Ladungsmenge betrachtet. Mit diesem Ansatz könnte weiterführend überprüft werden, ob und unter welchen Bedingungen Wasserstoff in der Containerschiffahrt eingesetzt werden könnte. Unter der Annahme, dass ein Schiff auf eine Route mehrfach betankt werden könnte, würde der Nachteil des hohen Platzbedarfs von Wasserstoff ausgeglichen werden können. Die entstehenden Opportunitätskosten werden in diesem Fall den Produktionskosten gegenübergestellt. Demnach stellt die in dieser Masterarbeit entwickelte Methodik unter der Annahme einer neu erdachten Betriebsführung, eine Basis für eine wissenschaftliche Bewertung des Einsatzes von wasserstoffbetriebenen Containerschiffen dar.

„Um ein Problem zu lösen, muss man es größer machen.“ Hoffmann, 2018 [134]

Die Aussage in dem aufgeführten Zitat kann entnommen werden, dass aus einer Zusammenführung mehrerer Problemstellungen eine Vergrößerung der Schnittmenge an Lösungsoptionen hervorgeht. Dies wird bei der bevorstehenden Umstellung auf klimaneutrale Antriebe bei nicht elektrifizierbaren Transportmitteln, wie dem zivilen Luftverkehr und der Überseeschiffahrt, ersichtlich. Sobald in diesen Bereichen eine industrielle Umsetzung hin zu regenerativen Kraftstoffen angestrebt wird, können diese voneinander profitieren.

Investitionshürden in unsicheren Technologien sowie infrastrukturelle Fixkosten können aufgeteilt werden. Durch den addierten Treibstoffbedarf können größere Preissenkungen durch Lernrateneffekte hervorgerufen werden. Die saisonale Schwankung der Bedarfe könnte langfristig durch Bedarfszusammenführung unterschiedlicher Sektoren geglättet werden. Weiterführend gedacht könnten ebenfalls prozessbedingte Emissionen der Industrie für die Produktion von synthetischen Kraftstoff verwendet und deren eigene CO₂-Bilanz verbessert werden.

Aus diesen Gründen muss die systemtheoretische Betrachtung der angestrebten Dekarbonisierung des Luft- und Seeverkehrssektors mit seinen global in Verbindung stehenden Transportmitteln auf eine weltumfassende Ebene ausgedehnt werden. Eine sich hieraus ergebende multinationale Energiesystemmodellierung ist aus Sicht des Autors ein wichtiger Schritt zur Erstellung von wegweisenden Handlungsempfehlungen für eine Umstellung des Energiesystems hin zur einer klimaneutralen Welt. Diese Masterarbeit soll durch die erarbeiteten Konzepte und neuen Denkansätzen einen kleinen Beitrag dazu leisten.

7 Literatur

- [1] *Paris Agreement: UN/UNO*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [2] S. Khalili, E. Rantanen, D. Bogdanov und C. Breyer, „Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World“ (en), *Energies*, Jg. 12, Nr. 20, S. 3870, 2019, doi: 10.3390/en12203870.
- [3] International Energy Agency und IEA, *Data and statistics: Explore energy data by category, indicator, country or region*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>.
- [4] B. Graver und Zhang, Kevin, Rutherford, Dan, *CO2 emissions from commercial aviation, 2018: Global aviation CO2 inventory, 2018 (spreadsheet data)*. [Online]. Verfügbar unter: https://theicct.org/sites/default/files/ICCT_Global-Aviation-CO2-Inventory-2018.xlsx.
- [5] J. e. a. Faber, „Fourth IMO GHG Study 2020“, London, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>. Zugriff am: 29. April 2021.
- [6] S. Horvath, M. Fasihi und C. Breyer, „Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 164, S. 230–241, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.098.
- [7] J. e. a. Bopst, „Umweltschonender Luftverkehr lokal – national – international“, Dessau-Roßlau, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschonender-luftverkehr>. Zugriff am: 12. April 2021.
- [8] Ram M., Galimova T., Bogdanov D., Fasihi M., Gulagi, „Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050“, Lappeenranta, Berlin, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/study-powerfuels-in-a-renewable-energy-world-global-volumes-costs-and-trading-2030-to-2050/>. Zugriff am: 22. April 2021.
- [9] Energy Transition Outlook 2018, Hg., „Maritime Forecast to 2050“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://eto.dnvgi.com/2018/maritime>. Zugriff am: 13. April 2021.

-
- [10] K. Löffler, K. Hainsch, T. Burandt, P.-Y. Oei, C. Kemfert und C. von Hirschhausen, „Designing a Model for the Global Energy System—GENeSYS-MOD: An Application of the Open-Source Energy Modeling System (OSeMOSYS)“, *Energies*, Jg. 10, Nr. 10, S. 1468, 2017, doi: 10.3390/en10101468.
- [11] S. Teske, *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [12] W. e. a. Krewitt, „energy [r]evolution: a sustainable world energy outlook 2015“, DLR, Institute of Technical Thermodynamics, Department of Systems Analysis and Technology Assessment, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.greenpeace.org/canada/en/publication/1572/energy-revolution-2015-the-latest-documentation-2/>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [13] M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi, M. A. Cameron und B. V. Mathiesen, „Matching demand with supply at low cost in 139 countries among 20 world regions with 100% intermittent wind, water, and sunlight (WWS) for all purposes“, *Renewable Energy*, Jg. 123, S. 236–248, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.009.
- [14] E. Pursiheimo, H. Holttinen und T. Koljonen, „Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system“, *Renewable Energy*, Jg. 136, S. 1119–1129, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.082.
- [15] WWF, Hg., „The Energy Report: 100 % RENEWABLE ENERGY BY 2050“, Gland, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/the-energy-report-100-renewable-energy-by-2050/12083020>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [16] G. Luderer *et al.*, „Residual fossil CO₂ emissions in 1.5–2 °C pathways“, *Nature Clim Change*, Jg. 8, Nr. 7, S. 626–633, 2018, doi: 10.1038/s41558-018-0198-6.
- [17] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2019*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (Zugriff am: 25. April 2021).
- [18] World Energy Council, Hg., „World Energy Scenarios 2019: Exploring Innovation Pathways to 2040“, London, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/European_Scenarios_FINAL_for_website.pdf. Zugriff am: 25. April 2021.
- [19] DNV GL SE, „Energy Transition Outlook 2019“, Høvik, Norwegen, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://eto.dnv.com/2019#ETO2019-top>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [20] Shell International B.V., „Sky Scenario“, Den Haag, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html>. Zugriff am: 25. April 2021.

- [21] BP p.l.c, Hg., „BP Energy Outlook“, London, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [22] ExxonMobil, Hg., „2017 Outlook for Energy: A View to 2040“, Irvine, 2017. [Online]. Verfügbar unter: energynow.ca/wp-content/uploads/exxon-2017_outlook_for_energy-report.pdf.
- [23] U.S. Energy Information Administration, Hg., „Global Transportation Energy Consumption: Examination of Scenarios to 2040 using ITEDD“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eia.gov/analysis/studies/transportation/scenarios/pdf/globaltransportation.pdf>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [24] Y. Y. Deng, K. Blok, K. van der Leun und C. Petersdorff, „Transition to a Fully Sustainable Global Energy System“ in *Transition to Renewable Energy Systems*, D. Stolten und V. Scherer, Hg., Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, S. 93–118, doi: 10.1002/9783527673872.ch7.
- [25] TOTAL Deutschland GmbH, *der Flugturbinenkraftstoff für die internationale Luftfahrt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.total.de/produkte/kraftstoffe/flugkraftstoffe/jet-a1>.
- [26] M. Braun-Unkhoff, T. Kathrotia, B. Rauch und U. Riedel, „About the interaction between composition and performance of alternative jet fuels“, *CEAS Aeronaut J*, Jg. 7, Nr. 1, S. 83–94, 2016, doi: 10.1007/s13272-015-0178-8.
- [27] Prof. Dr.-Ing. C. Jahn, *Soziale und Umweltaspekte der autonomen Schifffahrt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/512629/> (Zugriff am: 12. April 2021).
- [28] N. Pavlenko, B. Comer, Y. Zhou, N. Clark und D. Rotherford, „The climate implications of using LNG as a marine fuel“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel%2C%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf. Zugriff am: 12. April 2021.
- [29] S. Richter, M. Braun-Unkhoff, C. Naumann und U. Riedel, „Paths to alternative fuels for aviation“, *CEAS Aeronaut J*, Jg. 9, Nr. 3, S. 389–403, 2018, doi: 10.1007/s13272-018-0296-1.
- [30] Andreas Burkert, *Regeneratives Methan statt Schweröl und Schiffsdiesel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/abgasnachbehandlung/regeneratives-methan-statt-schweroel-und-schiffsdiesel/10595516>.

-
- [31] P. Viebahn, O. Zelt, M. Fishedick, M. Wietschel, S. Hirzel und J. Horst, *Technologien für die Energiewende - Technologiebericht Band 2 : Teilbericht 2 zum Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts "Trends und Perspektiven der Energieforschung"*, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
<https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7083>
- [32] S. Pichelmaier, T. Hübner und S. Kigle, *Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X*. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.ffe.de/publikationen/pressemitteilungen/892-elektrolyse-die-schlüsseltechnologie-fuer-power-to-x> (Zugriff am: 12. April 2021).
- [33] K. Ghaib, *Das Power-to-Methane-Konzept: Von den Grundlagen zum gesamten System*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.springer.com/>
- [34] A. Tremel, *Electricity-Based Fuels*. Cham: Springer, 2017. [Online]. Verfügbar unter:
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5219527>
- [35] Virtuelles Institut "Strom zu Gas und Wärme" : *Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System ; Abschlussbericht des Hauptprojekts 2015-2017*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7259>
- [36] T. e. a. Smolinka, „Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme“, Berlin, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-indWEDe.html>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [37] M. Klell, H. Eichseder und A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [38] J. Töpler und J. Lehmann, Hg., *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.springer.com/>
- [39] M. Fishedick, K. Görner und M. Thomeczek, Hg., *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung: Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie*. Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [40] P. Markewitz, L. Zhao und M. Robinius, „Technologiebericht 2.3 CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende“, Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2017.

- [41] N. e. a. Wermuth, „The HyMethShip Project: Innovative Emission Free Propulsion for Maritime Applications“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hymethship.com/wp-content/uploads/2021/02/Wermuth-et-al-The-HyMethShip-Project-Authors-manuskript-17th-FAD-Dresden.pdf>. Zugriff am: 25. April 2021.
- [42] F. Beenken, *Verhalten einer Gasturbine mit sequentieller Verbrennung unter Abgasrezirkulations- und Oxyfuel-Bedingungen*. Fakultät Maschinenbau/Allgemein, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://edoc.sub.uni-hamburg.de/hsu/volltexte/2018/3184/>
- [43] Dipl.-Ing. Gregor Herz, *CO₂-Reduzierte Stahlproduktion durch elektrolysegestützte Direktreduktion*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/umwelttechnik_verfahrenstechnik/chemische_verfahrenstechnik/systemverfahrenstechnik/fa_co2-reduzierte_stahlproduktion_durch_elektrolytgestuetzte_direktreduktion.html.
- [44] Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, *CO₂-minimierte Roheisenproduktion mit vorreduzierten Eisenträgern*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energy-innovation-austria.at/article/co2-minimierte-roheisenproduktion/>.
- [45] Schlemme et al., „Energiewende in der Industrie: Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Zugriff am: 25. April 2021.
- [46] Henning Bartels, *Wasserstoff statt Kohle: Wie wird Stahl grün?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/verband/magazin-2050/wasserstoff-statt-kohle-der-stahl-der-zukunft-ist-klimafreundlich/>.
- [47] Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbh, Hg., „CO₂-Verminderung in der Primäraluminiumherstellung“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720_Energiewende_in_der_Industrie/CO2-Verminderung_in_der_Prim%C3%A4raluminiumherstellung.pdf. Zugriff am: 25. April 2021.
- [48] *Handbuch der experimentellen Chemie*.
- [49] H. H. Binder, *Lexikon der chemischen Elemente: Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten ; mit vielen tabellarischen Zusammenstellungen*. Stuttgart: Hirzel, 1999.
- [50] E. Bellmann und P. Zimmermann, *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie Hintergrund und Handlungsoptionen*. [Online]. Verfügbar unter:

-
- https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf (Zugriff am: 22. April 2021).
- [51] CEMBUREAU - The European Cement Association, Hg., „Activity Report 2017“, Brüssel, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://cembureau.eu/media/vxyilmsd/activity-report-2017.pdf>. Zugriff am: 12. April 2021.
- [52] P. Viebahn, A. Scholz und O. Zelt, „Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture – Ergebnis einer multidimensionalen Analyse“, ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN 12, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/files/7438/7438_Viebahn.pdf. Zugriff am: 12. April 2021.
- [53] M. Fasihi, O. Efimova und C. Breyer, „Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 224, S. 957–980, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.
- [54] D. Kronenberger, "Climeworks Prozesseigenschaften", E-Mail, Jun. 2017.
- [55] C. Wilhelm, „Katalytische Hydrierung von Kohlendioxid an Metall- Träger-Katalysatoren in der Gasphase“. Dissertation, Fachbereich Chemie der Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/year/2016/docId/4450>
- [56] M. Bargende, H.-C. Reuss und J. Wiedemann, Hg., *16. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik ; Band 1*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4515778>
- [57] [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/iata-rechnet-2019-mit-schwaecherem-wachstum-im-luftverkehr-2246467.html>.
- [58] *Annual Review 2018* (Zugriff am: 13. April 2021).
- [59] Frédéric Mainzer, „Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Reiseflug“, 2007.
- [60] H2Fly GmbH, *Produktübersicht*. [Online]. Verfügbar unter: <https://h2fly.de/?lang=de> (Zugriff am: 12. April 2021).
- [61] Airbus Group SE, *ZEROe: Towards the world's first zero-emission commercial aircraft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html#hydrogen> (Zugriff am: 12. April 2021).
- [62] International Civil Aviation Organization, Hg., „POWER-TO-LIQUIDS (PTL): SUSTAINABLE FUELS FOR AVIATION“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_526_en.pdf. Zugriff am: 23. April 2021.

- [63] D. e. a. Rojas, „Powerfuels in Aviation“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/positionspapier-powerfuels-in-aviation/>. Zugriff am: 23. April 2021.
- [64] J. Graichen, S. Gores und A. Herold, „Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs“, Berlin, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/ueberarbeitung-des-emissionsinventars-des-flugverkehrs>. Zugriff am: 12. April 2021.
- [65] B. Graver, D. Rutherford und S. Zheng, „CO2 EMISSIONS FROM COMMERCIAL AVIATION 2013, 2018, AND 2019“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://theicct.org/publications/co2-emissions-commercial-aviation-2020>. Zugriff am: 12. April 2021.
- [66] A. Schönknecht, *Maritime Containerlogistik: Leistungsvergleich von Containerschiffen in intermodalen Transportketten*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springerlink.com/content/q02723>
- [67] United Nations Conference on Trade and Development, Hg., „REVIEW OF MARITIMETRANSPORT 2019“, Genf, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2019>. Zugriff am: 13. April 2021.
- [68] B. J. Cudahy, *TR News September-October 2006*
 The Intermodal Container Era: History, Security, and Trends. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2006.
- [69] R. Witthohn, *Transport, Arbeit und Erholung auf dem Meer: Die Rolle der Schifffahrt in der globalen Wirtschaft*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [70] Prof. Dr.-Ing. C. Jahn, *Containerschifffahrt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/11171/> (Zugriff am: 13. April 2021).
- [71] Prof. Dr.-Ing. C. Jahn, *Allianzen im Containerverkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/10985/> (Zugriff am: 13. April 2021).
- [72] N. Poskus, *Guide to Ocean Alliances*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.flexport.com/blog/what-are-ocean-alliances/>.
- [73] International Conference on Marine Pollution; Intergovernmental Maritime Consultative Organization, *International conference on marine pollution, 1973: Final act of the conference with attachments, including the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, 1977*. Aufl. London: IMCO, 1983.

-
- [74] International Maritime Organization, *MARPOL Annex VI and NTC 2008: With guidelines for implementation*, 2013. Aufl. London: IMO, 2013.
- [75] H. Harndorf, „Emissionstrategien für Großmotoren in der Schifffahrt: Herausforderungen und Lösungsansätze“, Berlin, 20. Mai 2019.
- [76] International Maritime Organization, Hg., „Third IMO GHG Study 2014: Executive Summary and Final Report“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/281242722_Third_IMO_GHG_Study_2014_Executive_Summary_and_Final_Report. Zugriff am: 13. April 2021.
- [77] *Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und Investitionen in CO₂-effiziente Technologien. Abänderungen des Europäischen Parlaments vom 15. Februar 2017 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung der Kosteneffizienz von Emissionsminderungsmaßnahmen und zur Förderung von Investitionen in CO₂-effiziente Technologien. (COM(2015)0337 – C8-0190/2015 –2015/0148(COD))1: S. 27, Änderungsantrag 36*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0035_DE.html
- [78] T. Johnson, *Towards a zero-carbon future*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maersk.com/news/articles/2019/06/26/towards-a-zero-carbon-future>.
- [79] H. Watter, *Schiffseffizienz: Praxisbeispiele für anwendungsorientiertes Wissenschaftsmanagement*. [Online]. Verfügbar unter: <https://maritimescluster.wordpress.com/2014/02/10/schiffseffizienz-praxisbeispiele-fuer-anwendungsorientiertes-wissenschaftsmanagement/> (Zugriff am: 25. April 2021).
- [80] B. Lenz, „SHELL LNG -STUDIE: VERFLÜSSIGTES ERDGAS – NEUE ENERGIE FÜR SCHIFF UND LKW?“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-lng-studie.html>. Zugriff am: 13. April 2021.
- [81] MariGreen, MARIKO gemein-nüt-zige GmbH, *Perspectives for the use of hydrogen in inland navigation*. [Online]. Verfügbar unter: <http://en.marigreen.eu/feasibility-hydrogen/> (Zugriff am: 13. April 2021).
- [82] *Wartsila Sulzer RTA96-C / Engine*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.emma-maersk.com/engine/Wartsila_Sulzer_RT96-C.htm (Zugriff am: 13. April 2021).
- [83] M. Niermann, S. Drünert, M. Kaltschmitt und K. Bonhoff, „Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain“, *Energy Environ. Sci.*, Jg. 12, Nr. 1, S. 290–307, 2019, doi: 10.1039/C8EE02700E.
- [84] Deutsche Energie-Agentur GmbH, *Power to X: Technologien: Power Fuels*. [Online]. Verfügbar unter:

- https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf (Zugriff am: 25. April 2021).
- [85] M. e. a. Fasihi, „GLOBAL POTENTIAL OF POWER-TO-AMMONIA BASED ON HYBRID PV-WIND POWER PLANTS: Neo-Carbon Energy 9th Researchers’ Seminar“, Lappeenranta, 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://www.neocarbonenergy.fi/wp-content/uploads/2016/02/04_Fasihi-1.pdf. Zugriff am: 25. April 2021.
- [86] DIHK Service GmbH und Projektreferent Young Energy, *Januar 2019 – Effiziente Eigenproduktion von Stickstoff bei Festo in Bulgarien*. [Online]. Verfügbar unter: <https://young-energy-europe.eu/januar-2019-effiziente-eigenproduktion-von-stickstoff-statt-aufwendiger-zulieferung/> (Zugriff am: 26. April 2021).
- [87] *Kartenausschnitt Persischer Golf*. Google LLC. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.com/maps/place/Persischer+Golf/@32.0185127,24.7246959,1898m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x3e43baa0d01c0fd7:0x670637ef2b576d2e!8m2!3d26.7505337!4d51.6834275>
- [88] Technical University of Denmark, *Global Wind Atlas 3.0, a free, web-based application developed, owned and operated by the Technical University of Denmark (DTU). The Global Wind Atlas 3.0 is released in partnership with the World Bank Group, utilizing data provided by Vortex, using funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://globalwindatlas.info/> (Zugriff am: 4. Mai 2021).
- [89] Technical University of Denmark, *Global Solar Atlas 2.0, a free, web-based application is developed and operated by the company Solargis s.r.o. on behalf of the World Bank Group, utilizing Solargis data, with funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://globalsolaratlas.info/map> (Zugriff am: 4. Mai 2021).
- [90] Fraunhofer IEE, „DeVKopSys - Dekarbonierung Verkehr - Rückkopplung Energiesystem“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/DeVKopSys.html>. Zugriff am: 26. April 2021.
- [91] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, *ERA5*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Zugriff am: 26. April 2021).
- [92] N. Gerhardt, „SCOPE: Sektorenübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems“, 2018. [Online]. Verfügbar unter:

-
- https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/2018_F_SCOPE_Einzelseiten.pdf. Zugriff am: 13. April 2021.
- [93] International Renewable Energy Agency, Hg., „Renewable Power Generation Costs in 2017“, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>. Zugriff am: 26. April 2021.
- [94] C. Pfister, „Kostenentwicklung von Wind- und Photovoltaikstrom im internationalen Vergleich“. Masterarbeit, Technische Hochschule Köln, Köln, 2018.
- [95] CINES. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/institute/institute-einrichtungen-deutschland/cluster-of-excellence/integrated-energy-systems.html> (Zugriff am: 26. April 2021).
- [96] F. Ausfelder und H. E. Dura, „Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. Herausforderungen - Potenziale - Methoden - Auswirkungen : 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes "Power-to-X": Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X)“, Frankfurt am Main, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
<https://edocs.tib.eu/files/e01fn18/1034723774.pdf>. Zugriff am: 26. April 2021.
- [97] S. e. a. Kreidelmeyer, „Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger“, 2020. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationspfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am: 13. April 2021.
- [98] M. e. a. Pfennig, „MITTEL- UND LANGFRISTIGE POTENZIALE VON PTL- UND H2-IMPORTEN AUS INTERNATIONALEN EE-VORZUGSREGIONEN: Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMAWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT“, 2017. [Online]. Verfügbar unter:
http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/includes/reports/Teilbericht_Potenziale_PtL_H2_Importe_FraunhoferIWES.pdf. Zugriff am: 26. April 2021.
- [99] J. Gorre, F. Ortloff und C. van Leeuwen, „Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage“, *Applied Energy*, Jg. 253, S. 113594, 2019, doi:
10.1016/j.apenergy.2019.113594.
- [100] H. Seidl und R. Heuke, „Technologieübersicht. Das deutsche Höchstspannungsnetz: Technologien und Rahmenbedingungen“, Berlin, 2014. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/technologieuebersicht.pdf?__blob=publicationFile&v=9. Zugriff am: 13. April 2021.
- [101] J. A. Wurzbacher, „Development of a temperature-vacuum swing process for CO₂ capture from ambient air“, ETH Zurich, 2015.

- [102]J. Elfving, C. Bajamundi, J. Kauppinen und T. Sainio, „Modelling of equilibrium working capacity of PSA, TSA and TVSA processes for CO₂ adsorption under direct air capture conditions“, *Journal of CO₂ Utilization*, Jg. 22, S. 270–277, 2017, doi: 10.1016/j.jcou.2017.10.010.
- [103]Climeworks AG, *Climeworks AG builds first commercial scale CO₂ Capture Plant*. [Online]. Verfügbar unter: <https://climeworks.com/news/climeworks-ag-builds-first-commercial-scale-co2-capture> (Zugriff am: 13. April 2021).
- [104]C. Gebald, N. Piatkowski, T. Ruesch und J. A. Wurzbacher, „Low-pressure drop structure of particle adsorbent bed for adsorption gas separation process,“ 2014255974, Okt 23, 2014.
- [105]S. Henniger und W. Kuttler, „Mobile CO₂-Messungen innerhalb der suburbanen/urbanen Grenzschicht der Stadt Essen“, 2004. [Online]. Verfügbar unter: https://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/ak_klima2004.pdf. Zugriff am: 26. April 2021.
- [106]C. Breyer, M. Fasihi und A. Aghahosseini, „Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling“ (En;en), *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, Jg. 25, Nr. 1, S. 43–65, 2020, doi: 10.1007/s11027-019-9847-y.
- [107]Eurostat, *Metadaten Luftverkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/main/data/database>.
- [108]atmosfair gGmbH, *atmosfair Flug-Emissionsrechner*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.atmosfair.de/de/standards/emissionsberechnung/emissionsrechner/> (Zugriff am: 13. April 2021).
- [109]Lufthansa Cargo AG, *Europas führende Frachtairline setzt weiter auf flexible Angebotssteuerung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lufthansa-cargo.com/de-DE/web/guest/-/lhc-press-media-details-2014-page3-1>.
- [110]M. e. a. MacDonald, „Annual Analyses related to the EU Air Transport Market 2016“, 2017.
- [111]CAPA - Centre for Aviation, *Air cargo upturn can't offset slumping airline passenger revenue*. [Online]. Verfügbar unter: <https://centreforaviation.com/analysis/reports/air-cargo-upturn-cant-offset-slumping-airline-passenger-revenue-539309> (Zugriff am: 13. April 2021).
- [112]T. Lohrmann, "Historical AIS data request", E-Mail, Mrz. 2021.

-
- [113]A. P. Moller-Maersk Group, *Fahrpläne - Search our extensive routes to find the schedule which fits your supply chain*. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.maersk.com/schedules/vesselSchedules?vesselCode=788&fromDate=2021-02-19> (Zugriff am: 14. April 2021).
- [114]China Ocean Shipping (Group) Company, *Sailing Schedules: Find Schedule by Vessel*. [Online]. Verfügbar unter:
<https://elines.coscoshipping.com/ebusiness/sailingSchedule/searchByCity> (Zugriff am: 14. April 2021).
- [115]Ocean Network Express Pte. Ltd., *Vessel Schedule*. [Online]. Verfügbar unter:
http://ecomm.one-line.com/ecom/CUP_HOM_3001.do (Zugriff am: 14. April 2021).
- [116]Prof. Dr.-Ing. C. Jahn, *Routenführung von Liniendiensten in der Containerschiffahrt*. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/11006/>.
- [117]eurostat/searoute. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/eurostat/searoute> (Zugriff am: 1. Mai 2021).
- [118]P. Frigge, S. Affolter, D. Bachmann und R. Jong, „Neue Zweitakt-Schiffsdieselmotoren von Wärtsilä“, *MTZ Motortech Z*, Jg. 72, Nr. 11, S. 846–853, 2011, doi: 10.1365/s35146-011-0185-1.
- [119]K. Cullinane und M. Khanna, „Economies of scale in large containerships: optimal size and geographical implications“, *Journal of Transport Geography*, Jg. 8, Nr. 3, S. 181–195, 2000, doi: 10.1016/S0966-6923(00)00010-7.
- [120]J. Eschmann, „Makroökonomische Folgewirkungen dekarbonisierter Containerschiffahrt: Spezifische Kosten und Preiseffekte am Beispiel Europas“. Masterarbeit, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Universität Kassel, 2020.
- [121]Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Heuertarifvertrag für die deutsche Seeschiffahrt (HTV-See)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.deutsche-flagge.de/de/redaktion/dokumente/dokumente-sonstige/htv-see-2020-gueltig-ab-1-januar-2020.pdf> (Zugriff am: 14. April 2021).
- [122]M. Stopford, *Maritime economics*, 3. Aufl. London: Routledge, 2009.
- [123]M. S. Peters, K. D. Timmerhaus und R. E. West, *Plant design and economics for chemical engineers*, 5. Aufl. Boston: McGraw-Hill, 2004. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.loc.gov/catdir/description/mh031/2002032568.html>
- [124]UNEP-WCMC, „Global Critical Habitat Screening Layer“, 2017.

- [125] UNEP Weltüberwachungszentrum für Naturschutz, *Discover the world's protected areas*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.protectedplanet.net/en> (Zugriff am: 14. April 2021).
- [126] *PtX-Atlas*. [Online]. Verfügbar unter: <https://maps.iee.fraunhofer.de/ptx-atlas/>.
- [127] K. Mollenhauer und H. Tschöke, *Handbuch Dieselmotoren*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10214376>
- [128] Deutsche Mathematiker-Vereinigung e.V., *Kombinatorik*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mathematik.de/algebra/96-erste-hilfe/stochastik/kombinatorik/1617-kombinatorik> (Zugriff am: 1. Mai 2021).
- [129] B. Graver und Zhang, Kevin, Rutherford, Dan, „CO2 emissions from commercial aviation 2018“, 19. Sep. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://theicct.org/publications/co2-emissions-commercial-aviation-2018>. Zugriff am: 15. April 2021.
- [130] HELLENIC SHIPPING NEWS Worldwide, *IMO 2020: Market Uncertainty Brings More Fuel Oil Price Volatility*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hellenicshippingnews.com/imo-2020-market-uncertainty-brings-more-fuel-oil-price-volatility/>.
- [131] Kleinbreuer, Franziska, "Anfrage zu detaillierten Informationen des verwendeten DAC-Filtermaterials", E-Mail, Nov. 2020.
- [132] BRS GROUP, Hg., „Shipping & Shipbuilding Markets: Annual review 2020“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.brsbrokers.com/annualreview2020.html>. Zugriff am: 19. April 2021.
- [133] C. e. a. Gebald, „DIRECT AIR CAPTURE DEVICE,“ US 2017/0106330 A1. USA 15/315,930.
- [134] C. Hoffmann, „Systemtheorie der Energiewende“. Universität Kassel, 2018.

Anhang

- A. Kriterienkatalog für Auswahl der PtX-Vorrangflächen
- B. Kraftstoffproduktionsstandorte
- C. Kartenausschnitt und Darstellung der Kehrichtverbrennungsanlage am Standort Hinwil
- D. Untersuchte Containerschiffe
- E. Identifizierte Häfen
- F. Standorte der Kraftstoffproduktionseinrichtungen, bzw. Betankungspunkte
- G. Identifizierte Verkehrslast und auf Länder zugeordneter Kraftstoffbedarf

Anhang A – Kriterienkatalog für Auswahl der PtX-Vorrangflächen

Schritt	Ausschlusskriterium	Argument
1	Landnutzung	Waldflächen, Siedlungsflächen, Agrarflächen, Wasserflächen, Permanente Schnee- und Eisflächen, gemischte Flächen
1	Hangneigung	> 5 % (im 1 km Raster)
1	Siedlungsgebiete	Bebaute Flächen inkl. 1 km Puffer
1	Bevölkerungsdichte	> 50 Einwohner/km ²
1	Schutzgebiete	Natur- und Landschaftsschutz sowie potenziell kritische Lebensräume inkl. 1 km Puffer
2	Stromgestehungskosten Wind*	> 4 ct/kWh
2	Stromgestehungskosten PV*	> 3 ct/kWh
3	Distanz zu Häfen	> 500 km
3	Distanz zu Pipelines	> 50 km
3	Distanz zu Städten	> 200 km
3K	Distanz zur landeseigenen Küste	> 50 km
3K	Marine Schutzgebiete	Landesflächen entlang marinen Schutzgebieten inkl. 4 km Puffer
3B	Distanz zu Binnengewässern	> 50 km
3B	Wasserstress	> Gering

Anhang B – Kraftstoffproduktionsstandorte

ID	ISO 3	Land	Standort	Lat.	Long.	Ü.-Dist. [km]
1	VEN	Venezuela	Cabo San Romano	12,192	-70.012	0
2	LBY	Libyen	Gulf of Bomba	32,633	23.110	0
3	EGY	Ägypten	Salum	31,628	25.154	0
4	EGY	Ägypten	Ras Gharib	28,789	32.796	0
5	SAU	Saudi-Arabien	Al Nabah	24.359	37.438	0
6	SDN	Sudan	Tawkar	18.599	37.866	0
7	ERI	Eritrea	Southern Dankalia	13.584	42.270	0
8	YEM	Jemen	Al Bahiyah	12.604	44.054	0
9	DJI	Dschibuti	Alalili Dadda	12.663	43.159	0
10	SOM	Somalia	Berbera	10.859	45.769	20
11	OMN	Oman	Ghalat	20.844	58.746	0
12	QAT	Katar	AlWakra	24.726	51.465	17
13	ZAF	Südafrika	Port Alfred	-33.535	27.071	50
14	LKA	Sri Lanka	Kirinda	6.192	81.292	340
15	CHN	China	Waiyu	24.159	117.985	1.785
16	TUN	Tunesien	El Janna	37.309	9.559	317
17	DZA	Algerien	Gdyel	36.614	1.431	334
18	USA	USA	Onslow Beach	34.585	-77.251	80
19	CHN	China	Shuangyang Port	34.006	120.394	1.057
20	USA	USA	Lobitos	37.366	-122.409	80
21	PER	Peru	Chiclayo	-6.331	-80.709	82

Anhang C – Kartenausschnitt und Darstellung der Kehrichtverbrennungsanlage am Standort Hinwil, Schweiz



Quelle: <https://www.google.de/maps>



Quelle: <https://www.nzz.ch/wissenschaft/kohlendioxid-rueckgewinnung-ein-zuercher-start-up-unternehmen-praesentiert-eine-weltpremiere-im-zuercher-oberland-ld.1298424>, geprüft am 30.04.2021

Anhang D – Untersuchte Containerschiffe

Nr.	Name	Reederei	Konsortium	IMO-Nummer	Baujahr	DWT	TEU
1	Afif	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9732345	2017	150000	14993
2	Ain Snan	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525869	2011	145528	13500
3	Al Dahna	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708825	2016	199744	19870
4	Al Dhail	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9732307	2016	150000	14993
5	Al Jasrah	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9732321	2016	150000	14993
6	Al Jmelyyah	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9732357	2017	150000	14993
7	Al Mashrab	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9732319	2016	150000	14993
8	Al Murabba	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708837	2014	150000	14993
9	Al Muraykh	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708863	2015	199744	19870
10	Al Nasriyah	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708849	2015	150000	14993
11	Al Nefud	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708813	2015	199744	19870
12	Al Qibla	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525924	2012	145528	13500
13	Al Riffa	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525912	2012	145528	13500
14	Al Zubara	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708875	2015	199744	19870
15	Alula	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525883	2012	145528	13500
16	Antwerpen Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9612997	2012	142092	13177
17	APL Adviser	APL	Ocean Alliance	9631993	2014	150936	17000
18	APL Changi	APL	Ocean Alliance	9631981	2014	150936	17000
19	APL Esplanade	APL	Ocean Alliance	9632038	2014	150936	17000
20	APL Fullerton	APL	Ocean Alliance	9632026	2014	150936	17000
21	APL Lion City	APL	Ocean Alliance	9631967	2014	150936	17000
22	APL Merlion	APL	Ocean Alliance	9632014	2014	150936	17000
23	APL Raffles	APL	Ocean Alliance	9631979	2014	150936	17000
24	APL SENTOSA	APL	Ocean Alliance	9632040	2014	150936	17000
25	APL Singapura	APL	Ocean Alliance	9632002	2014	150936	17000
26	APL Temasek	APL	Ocean Alliance	9631955	2014	150936	17000
27	Barzan	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708851	2015	199744	19870
28	Basle Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9501344	2012	142092	13177
29	CGM Antoine de Saint-Exupéry	CMA CGM	Ocean Alliance	9776418	2018	202684	20776
30	CMA CGM Alexander von Humboldt	CMA CGM	Ocean Alliance	9454448	2016	186470	16020
31	CMA CGM Amerigo Vespucci	CMA CGM	Ocean Alliance	9454395	2013	165375	13344
32	CMA CGM Benjamin Franklin	CMA CGM	Ocean Alliance	9706891	2017	186528	17722
33	CMA CGM Bougainville	CMA CGM	Ocean Alliance	9702156	2017	186528	17722
34	CMA CGM Christophe Colomb	CMA CGM	Ocean Alliance	9453559	2013	165375	13344
35	CMA CGM Corte Real	CMA CGM	Ocean Alliance	9454400	2013	165375	13344
36	CMA CGM Georg Forster	CMA CGM	Ocean Alliance	9702144	2017	186528	17722
37	CMA CGM Jean Mermoz	CMA CGM	Ocean Alliance	9776420	2018	202684	20776
38	CMA CGM Jules Verne	CMA CGM	Ocean Alliance	9454450	2016	186470	16020
39	CMA CGM Kerguelen	CMA CGM	Ocean Alliance	9702132	2017	186528	17722
40	CMA CGM Laperouse	CMA CGM	Ocean Alliance	9454412	2013	165375	13344
41	CMA CGM Louis Bleriot	CMA CGM	Ocean Alliance	9776432	2018	202684	20776
42	CMA CGM Magellan	CMA CGM	Ocean Alliance	9454424	2013	165375	13344

Anhang

43	CMA CGM Marco Polo	CMA CGM	Ocean Alliance	9454436	2016	186470	16020
44	CMA CGM Vasco de Gama	CMA CGM	Ocean Alliance	9706889	2017	186528	17722
45	CMA CGM Zheng He	CMA CGM	Ocean Alliance	9706906	2017	186528	17722
46	COSCO Africa	COSCO	Ocean Alliance	9345439	2008	114394	10062
47	COSCO AMERICA	COSCO	Ocean Alliance	9345427	2008	114394	10062
48	COSCO ASIA	COSCO	Ocean Alliance	9345403	2007	114394	10062
49	COSCO BELGIUM	COSCO	Ocean Alliance	9516404	2013	156700	13386
50	COSCO DENMARK	COSCO	Ocean Alliance	9516478	2014	156700	13386
51	COSCO DEVELOPMENT	COSCO	Ocean Alliance	9472139	2011	140609	13114
52	COSCO ENGLAND	COSCO	Ocean Alliance	9516428	2013	156700	13386
53	COSCO EUROPE	COSCO	Ocean Alliance	9345415	2008	114394	10062
54	COSCO EXCELLENCE	COSCO	Ocean Alliance	9472189	2012	140609	13114
55	COSCO FAITH	COSCO	Ocean Alliance	9472141	2012	140609	13114
56	COSCO FORTUNE	COSCO	Ocean Alliance	9472127	2012	140609	13114
57	COSCO FRANCE	COSCO	Ocean Alliance	9516416	2013	156700	13386
58	COSCO GLORY	COSCO	Ocean Alliance	9466245	2011	140609	13114
59	COSCO HARMONY	COSCO	Ocean Alliance	9472177	2011	140609	13114
60	COSCO HOPE	COSCO	Ocean Alliance	9472165	2012	140609	13114
61	COSCO ITALY	COSCO	Ocean Alliance	9516454	2014	156700	13386
62	COSCO KAOHSIUNG	COSCO	Ocean Alliance	9355563	2008	111385	10020
63	COSCO NETHERLANDS	COSCO	Ocean Alliance	9516430	2013	156700	13386
64	COSCO Oceania	COSCO	Ocean Alliance	9334923	2008	111385	10020
65	COSCO Pacific	COSCO	Ocean Alliance	9355551	2008	111385	10020
66	COSCO PORTUGAL	COSCO	Ocean Alliance	9516466	2014	156700	13386
67	COSCO PRIDE	COSCO	Ocean Alliance	9472153	2011	140609	13114
68	COSCO SHIPPING ALPS	COSCO	Ocean Alliance	9757864	2018	153500	14566
69	COSCO Shipping Aquarius	COSCO	Ocean Alliance	9789623	2019	198070	20038
70	COSCO SHIPPING ARIES	COSCO	Ocean Alliance	9783497	2018	197087	19273
71	COSCO Shipping Azalea	COSCO	Ocean Alliance	9785756	2019	146513	13800
72	COSCO Shipping Camellia	COSCO	Ocean Alliance	9785782	2019	146513	13800
73	COSCO SHIPPING CAPRICORN	COSCO	Ocean Alliance	9783514	2018	197087	19273
74	COSCO SHIPPING DENALI	COSCO	Ocean Alliance	9757876	2018	153500	14566
75	COSCO Shipping Galaxy	COSCO	Ocean Alliance	9795634	2019	198070	20038
76	COSCO SHIPPING Gemini	COSCO	Ocean Alliance	9783526	2018	201868	20119
77	COSCO SHIPPING HIMALAYAS	COSCO	Ocean Alliance	9757840	2017	153500	14566
78	COSCO Shipping Jasmine	COSCO	Ocean Alliance	9785768	2018	146513	13800
79	COSCO SHIPPING KILIMANJARO	COSCO	Ocean Alliance	9757852	2017	153500	14566
80	COSCO SHIPPING Leo	COSCO	Ocean Alliance	9783502	2018	197087	19273
81	COSCO SHIPPING LIBRA	COSCO	Ocean Alliance	9783538	2018	201868	20119
82	COSCO Shipping Lotus	COSCO	Ocean Alliance	9785811	2019	146513	13800
83	COSCO Shipping Nebula	COSCO	Ocean Alliance	9795622	2019	198070	20038
84	COSCO Shipping Orchid	COSCO	Ocean Alliance	9785770	2018	146513	13800
85	COSCO Shipping Peony	COSCO	Ocean Alliance	9785744	2019	146513	13800
86	COSCO Shipping Pisces	COSCO	Ocean Alliance	9789647	2019	198070	20038
87	COSCO Shipping Planet	COSCO	Ocean Alliance	9795660	2019	198070	20038

88	COSCO Shipping Rose	COSCO	Ocean Alliance	9785809	2018	146513	13800
89	COSCO Shipping Sagittarius	COSCO	Ocean Alliance	9783473	2019	198070	20038
90	COSCO Shipping Sakura	COSCO	Ocean Alliance	9785794	2018	146513	13800
91	COSCO SHIPPING SCORPIO	COSCO	Ocean Alliance	9789635	2018	197087	19273
92	COSCO Shipping Solar	COSCO	Ocean Alliance	9795646	2019	198070	20038
93	COSCO Shipping Star	COSCO	Ocean Alliance	9795658	2019	198070	20038
94	COSCO SHIPPING TAURUS	COSCO	Ocean Alliance	9783459	2018	201868	20119
95	COSCO SHIPPING UNIVERSE	COSCO	Ocean Alliance	9795610	2018	198485	21237
96	COSCO SHIPPING VIRGO	COSCO	Ocean Alliance	9783461	2018	201868	20119
97	COSCO SPAIN	COSCO	Ocean Alliance	9516442	2014	156700	13386
98	COSCO Taicang	COSCO	Ocean Alliance	9355575	2009	111385	10020
99	CSCL ARCTIC OCEAN	COSCO	Ocean Alliance	9695169	2015	184320	18982
100	CSCL ATLANTIC OCEAN	COSCO	Ocean Alliance	9695145	2015	184320	18982
101	CSCL AUTUMN	COSCO	Ocean Alliance	9645891	2014	121824	10036
102	CSCL BOHAI SEA	COSCO	Ocean Alliance	9645889	2014	121824	10036
103	CSCL EAST CHINA SEA	COSCO	Ocean Alliance	9645918	2013	121824	10036
104	CSCL GLOBE	COSCO	Ocean Alliance	9695121	2014	184320	18982
105	CSCL INDIAN OCEAN	COSCO	Ocean Alliance	9695157	2015	184320	18982
106	CSCL JUPITER	COSCO	Ocean Alliance	9467263	2011	155470	14074
107	CSCL MARS	COSCO	Ocean Alliance	9467287	2011	155470	14074
108	CSCL MERCURY	COSCO	Ocean Alliance	9467275	2011	155470	14074
109	CSCL NEPTUNE	COSCO	Ocean Alliance	9467316	2012	155470	14074
110	CSCL PACIFIC OCEAN	COSCO	Ocean Alliance	9695133	2014	184320	18982
111	CSCL SATURN	COSCO	Ocean Alliance	9467299	2011	155470	14074
112	CSCL SOUTH CHINA SEA	COSCO	Ocean Alliance	9645920	2014	121824	10036
113	CSCL SPRING	COSCO	Ocean Alliance	9645853	2014	121824	10036
114	CSCL STAR	COSCO	Ocean Alliance	9466867	2011	155470	14074
115	CSCL SUMMER	COSCO	Ocean Alliance	9645865	2014	121824	10036
116	CSCL URANUS	COSCO	Ocean Alliance	9467304	2012	155470	14074
117	CSCL VENUS	COSCO	Ocean Alliance	9467251	2011	155470	14074
118	CSCL WINTER	COSCO	Ocean Alliance	9645877	2014	121824	10036
119	CSCL YELLOW SEA	COSCO	Ocean Alliance	9645906	2014	121824	10036
120	Gerda Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9359052	2008	116100	10150
121	Gerner Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9359002	2008	116100	10150
122	Gunde Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9359014	2008	116100	10150
123	Gunhilde Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9359026	2008	116100	10150
124	Gustav Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9359038	2008	116100	10150
125	Essen Express	Hapag-Lloyd	THE ALLIANCE	9501370	2013	142092	13177
126	Guthorm Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9359040	2008	116100	10150
127	MSC Ariane	MSC	2M-Konsortium	9484443	2008-2010	166093	13050
128	MSC Aurora	MSC	2M-Konsortium	9484481	2008-2010	166093	13050
129	Ever Genius	Evergreen	Ocean Alliance	9810991	2018	199700	20388
130	Ever Gentle	Evergreen	Ocean Alliance	9786815	2019	199489	20388
131	Ever Gifted	Evergreen	Ocean Alliance	9786827	2018	199489	20388
132	Ever Given	Evergreen	Ocean Alliance	9786839	2015	199489	20388

Anhang

133	Ever Globe	Evergreen	Ocean Alliance	9811000	2019	199489	20388
134	Ever Glory	Evergreen	Ocean Alliance	9820855	2019	199489	20388
135	Ever Golden	Evergreen	Ocean Alliance	9811012	2018	199489	20388
136	Ever Goods	Evergreen	Ocean Alliance	9820922	2018	199489	20388
137	Ever Govern	Evergreen	Ocean Alliance	9832717	2015	199489	20388
138	Ever Grade	Evergreen	Ocean Alliance	9786841	2019	199489	20388
139	Ever Greet	Evergreen	Ocean Alliance	9832729	2019	199489	20388
140	EXPRESS BERLIN	Yang Ming	THE ALLIANCE	9484924	2011	122962	10114
141	MSC Camille	MSC	2M-Konsortium	9404651	2008-2010	166093	13050
142	MSC Clorinda	MSC	2M-Konsortium	9484429	2008-2010	166093	13050
143	MSC Danit	MSC	2M-Konsortium	9404649	2008-2010	166093	13050
144	MSC Deila	MSC	2M-Konsortium	9461415	2008-2010	166093	13050
145	MSC Melatilde	MSC	2M-Konsortium	9404675	2008-2010	166093	13050
146	MSC Paloma	MSC	2M-Konsortium	9441001	2008-2010	166093	13050
147	Hamburg Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9461051	2012	142092	13177
148	HMM ALGECIRAS	HMM	THE ALLIANCE	9863297	2020	228000	23964
149	HMM BLESSING	HMM	THE ALLIANCE	9742170	2018	134869	11000
150	HMM COPENHAGEN	HMM	THE ALLIANCE	9863302	2020	228000	23964
151	HMM DUBLIN	HMM	THE ALLIANCE	9863314	2020	228000	23964
152	HMM GDANSK	HMM	THE ALLIANCE	9863326	2020	228000	23964
153	HMM HAMBURG	HMM	THE ALLIANCE	9863338	2020	228000	23964
154	HMM HELSINKI	HMM	THE ALLIANCE	9863340	2020	228000	23964
155	HMM LE HAVRE	HMM	THE ALLIANCE	9868314	2020	228000	23964
156	HMM OSLO	HMM	THE ALLIANCE	9868326	2020	228000	23820
157	HMM ROTTERDAM	HMM	THE ALLIANCE	9868338	2020	228000	23820
158	HMM SOUTHAMPTON	HMM	THE ALLIANCE	9868340	2020	228000	23820
159	HMM STOCKHOLM	HMM	THE ALLIANCE	9868352	2020	228000	23820
160	Hong Kong Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9501356	2013	142092	13177
161	HYUNDAI AMBITION	HMM	THE ALLIANCE	9475703	2012	141550	13082
162	HYUNDAI DREAM	HMM	THE ALLIANCE	9637222	2014	145980	13154
163	HYUNDAI DRIVE	HMM	THE ALLIANCE	9637246	2014	145980	13154
164	HYUNDAI EARTH	HMM	THE ALLIANCE	9725110	2016	124092	10077
165	HYUNDAI HONOUR	HMM	THE ALLIANCE	9473731	2012	141550	13082
166	HYUNDAI HOPE	HMM	THE ALLIANCE	9637234	2014	145980	13154
167	HYUNDAI JUPITER	HMM	THE ALLIANCE	9725134	2016	124092	10077
168	HYUNDAI MARS	HMM	THE ALLIANCE	9725122	2016	124092	10077
169	HYUNDAI NEPTUNE	HMM	THE ALLIANCE	9725158	2016	124092	10077
170	HYUNDAI PLUTO	HMM	THE ALLIANCE	9725160	2016	124092	10077
171	HYUNDAI PRIDE	HMM	THE ALLIANCE	9637260	2014	145980	13154
172	HYUNDAI RESPECT	HMM	THE ALLIANCE	9475674	2012	141550	13082
173	HYUNDAI SATURN	HMM	THE ALLIANCE	9725146	2016	124092	10077
174	HYUNDAI SMART	HMM	THE ALLIANCE	9475686	2012	141550	13082
175	HYUNDAI SPEED	HMM	THE ALLIANCE	9475698	2012	141550	13082

176	HYUNDAI VICTORY	HMM	THE ALLIANCE	9637258	2014	145980	13154
177	Jebel Ali	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525936	2012	145528	13500
178	Leverkusen Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9613006	2014	142092	13177
179	Linah	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708801	2015	150000	14993
180	Ludwigshafen Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9613018	2014	142092	13177
181	MSC Rapallo	MSC	2M-Konsortium	9484455	2008-2010	166093	13050
182	MACKINAC BRIDGE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9689603	2015	147404	13900
183	MSC Teresa	MSC	2M-Konsortium	9469560	2008-2010	166093	13050
184	MADRID BRIDGE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9805453	2018	147404	13900
185	MSC Valeria	MSC	2M-Konsortium	9461439	2008-2010	166093	13050
186	MSC Vandya	MSC	2M-Konsortium	9484467	2008-2010	166093	13050
187	Maersk Edinburgh	Maersk	2M-Konsortium	9456757	2010	140580	13092
188	Maersk Edmonton	Maersk	2M-Konsortium	9458030	2010	140580	13092
189	Maersk Eindhoven	Maersk	2M-Konsortium	9456771	2010	140580	13092
190	Maersk Elba	Maersk	2M-Konsortium	9458078	2010	140580	13092
191	Maersk Emden	Maersk	2M-Konsortium	9456769	2010	140580	13092
192	Maersk Essen	Maersk	2M-Konsortium	9456783	2010	140580	13092
193	Maersk Essex	Maersk	2M-Konsortium	9458092	2010	140580	13092
194	Maersk Evora	Maersk	2M-Konsortium	9458080	2010	140580	13092
195	MSC Beatrice	MSC	2M-Konsortium	9399014	2008-2010	156301	13800
196	MSC Emanuela	MSC	2M-Konsortium	9399052	2008-2010	156301	13800
197	MSC Eva	MSC	2M-Konsortium	9401130	2008-2010	156301	13800
198	MSC Irene	MSC	2M-Konsortium	9399040	2008-2010	156301	13800
199	MSC Kalina	MSC	2M-Konsortium	9399026	2008-2010	156301	13800
200	Ebba Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321524	2007	156907	14770
201	Edith Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321548	2007	156907	14770
202	Eleonora Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321500	2007	156907	14770
203	Elly Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321536	2007	156907	14770
204	Emma Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321483	2007	156907	14770
205	Estelle Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321495	2007	156907	14770
206	Eugen Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321550	2007	156907	14770
207	Malik Al Ashtar	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525900	2012	145528	13500
208	Evelyn Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9321512	2007	156907	14770
209	MANHATTAN BRIDGE	ONE-Line	THE ALLIANCE	8604292	2015	147404	13900
210	Maersk Halifax	Maersk	2M-Konsortium	9784271	2015	162050	15226
211	Maersk Hamburg	Maersk	2M-Konsortium	9784312	2015	162050	15226
212	Maersk Hangzhou	Maersk	2M-Konsortium	9784300	2015	162050	15226
213	Maersk Hanoi	Maersk	2M-Konsortium	9784295	2015	162050	15226
214	Maersk Havana	Maersk	2M-Konsortium	9784336	2015	162050	15226
215	Maersk Herrera	Maersk	2M-Konsortium	9784324	2015	162050	15226
216	Maersk Hidalgo	Maersk	2M-Konsortium	9784283	2015	162050	15226
217	Maersk Hong Kong	Maersk	2M-Konsortium	9784257	2015	162050	15226
218	Maersk Horsburgh	Maersk	2M-Konsortium	9784269	2015	162050	15226
219	Maersk Houston	Maersk	2M-Konsortium	9848950	2015	162050	15226
220	Maersk Huacho	Maersk	2M-Konsortium	9848948	2015	162050	15226

Anhang

221	MSC Amsterdam	MSC	2M-Konsortium	9606338	2015	186650	16652
222	MSC Hamburg	MSC	2M-Konsortium	9647461	2015	186650	16652
223	MEISHAN BRIDGE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9805465	2018	147404	13900
224	MSC Istanbul	MSC	2M-Konsortium	9606326	2015	186650	16652
225	MSC London	MSC	2M-Konsortium	9606302	2015	186650	16652
226	MSC New York	MSC	2M-Konsortium	9606314	2015	186650	16652
227	MILANO BRIDGE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9778399	2018	147404	13900
228	MSC Venice	MSC	2M-Konsortium	9647473	2015	186650	16652
229	MOL BEACON	ONE-Line	THE ALLIANCE	9713337	2015	119324	10000
230	MOL BENEFACTOR	ONE-Line	THE ALLIANCE	9739666	2016	119324	10000
231	MOL BEYOND	ONE-Line	THE ALLIANCE	9739678	2016	119324	10000
232	MOL TRADITION	ONE-Line	THE ALLIANCE	9769300	2017	197106	20100
233	MOL TREASURE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9773222	2018	189766	20190
234	MOL TRIBUTE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9769295	2017	197106	20100
235	MOL TRIUMPH	ONE-Line	THE ALLIANCE	9769271	2017	197106	20100
236	MOL TRUTH	ONE-Line	THE ALLIANCE	9773210	2017	189766	20190
237	MONACO BRIDGE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9757204	2018	147404	13900
238	Maastricht Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9780483	2013–2015	194153	18270
239	Madison Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619945	2013–2015	194153	18270
240	Madrid Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9778791	2013–2015	194153	18270
241	Magleby Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619957	2013–2015	194153	18270
242	Majestic Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619919	2013–2015	194153	18270
243	Manchester Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9780445	2013–2015	194153	18270
244	Manila Maersk[34]	Maersk	2M-Konsortium	9780469	2013–2015	194153	18270
245	Marchen Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632143	2013–2015	194153	18270
246	Maren Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632129	2013–2015	194153	18270
247	Margrethe Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632131	2013–2015	194153	18270
248	Maribo Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619969	2013–2015	194153	18270
249	Marie Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619933	2013–2015	194153	18270
250	Marit Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632167	2013–2015	194153	18270
251	Marseille Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9778844	2013–2015	194153	18270
252	Marstal Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619971	2013–2015	194153	18270
253	Mary Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619921	2013–2015	194153	18270
254	Mathilde Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632179	2013–2015	194153	18270
255	Matz Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619983	2013–2015	194153	18270
256	Mayview Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9619995	2013–2015	194153	18270
257	Merete Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632064	2013–2015	194153	18270
258	Mette Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632155	2013–2015	194153	18270
259	Milan Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9778820	2013–2015	194153	18270
260	Mogens Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632090	2013–2015	194153	18270
261	Monaco Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9778832	2013–2015	194153	18270
262	Morten Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632105	2013–2015	194153	18270
263	Moscow Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9778818	2013–2015	194153	18270
264	Mumbai Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9780471	2013–2015	194153	18270
265	Munich Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9778806	2013–2015	194153	18270

266	Munkebo Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9632117	2013–2015	194153	18270
267	Murcia Maersk	Maersk	2M-Konsortium	9780457	2013–2015	194153	18270
268	MSC Clara	MSC	2M-Konsortium	9708693	2014-2015	199273	19224
269	MSC Maya	MSC	2M-Konsortium	9708679	2014-2015	199273	19224
270	MSC Oliver	MSC	2M-Konsortium	9703306	2014-2015	199273	19224
271	MSC Oscar	MSC	2M-Konsortium	9703291	2014-2015	199273	19224
272	MSC Sveva	MSC	2M-Konsortium	9708681	2014-2015	199273	19224
273	MSC Zoe	MSC	2M-Konsortium	9703318	2014-2015	199273	19224
274	MSC Diana	MSC	2M-Konsortium	9755933	2016-2017	200148	19437
275	MSC Ditte	MSC	2M-Konsortium	9754953	2016-2017	200148	19437
276	MSC Eloane	MSC	2M-Konsortium	9755957	2016-2017	200148	19437
277	MSC Erica	MSC	2M-Konsortium	9755191	2016-2017	200148	19437
278	MSC Ingy	MSC	2M-Konsortium	9755945	2016-2017	200148	19437
279	MSC Jade	MSC	2M-Konsortium	9762326	2016-2017	200148	19437
280	MSC Leanne	MSC	2M-Konsortium	9767390	2016-2017	200148	19437
281	MSC Mirja	MSC	2M-Konsortium	9762338	2016-2017	200148	19437
282	MSC Mirjam	MSC	2M-Konsortium	9767376	2016-2017	200148	19437
283	MSC Reef	MSC	2M-Konsortium	9754965	2016-2017	200148	19437
284	MSC Rifaya	MSC	2M-Konsortium	9767388	2016-2017	200148	19437
285	MSC Tina	MSC	2M-Konsortium	9762340	2016-2017	200148	19437
286	MSC Ambra	MSC	2M-Konsortium	9839480	2018-2020	228149	23500
287	MSC Arina	MSC	2M-Konsortium	9839284	2018-2020	228149	23500
288	MSC Febe	MSC	2M-Konsortium	9839478	2018-2020	228149	23500
289	MSC Gulsun	MSC	2M-Konsortium	9839430	2018-2020	228149	23500
290	MSC Isabella	MSC	2M-Konsortium	9839272	2018-2020	228149	23500
291	MSC Leni	MSC	2M-Konsortium	9839454	2018-2020	228149	23500
292	MSC Mia	MSC	2M-Konsortium	9839466	2018-2020	228149	23500
293	MSC Mina	MSC	2M-Konsortium	9839260	2018-2020	228149	23500
294	MSC Nela	MSC	2M-Konsortium	9839296	2018-2020	228149	23500
295	MSC Samar	MSC	2M-Konsortium	9839442	2018-2020	228149	23500
296	MSC Sixin	MSC	2M-Konsortium	9839301	2018-2020	228149	23500
297	New York Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9501332	2012	142092	13177
298	NYK CRANE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741401	2016	139335	14000
299	NYK OWL	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741449	2017	139335	14000
300	NYK SWAN	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741437	2017	139335	14000
301	NYK WREN	ONE-Line	THE ALLIANCE	9784776	2018	139335	14000
302	ONE APUS	ONE-Line	THE ALLIANCE	9806079	2019	138611	14000
303	ONE AQUILA	ONE-Line	THE ALLIANCE	9806043	2018	138611	14000
304	ONE BLUE JAY	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741372	2016	138611	14000
305	ONE COLUMBA	ONE-Line	THE ALLIANCE	9806055	2018	138611	14000
306	ONE CYGNUS	ONE-Line	THE ALLIANCE	9806081	2019	138611	14000
307	ONE FALCON	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741425	2017	138611	14000
308	ONE GRUS	ONE-Line	THE ALLIANCE	9806067	2019	138611	14050
309	ONE HAWK	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741413	2017	138611	14000
310	ONE IBIS	ONE-Line	THE ALLIANCE	9741384	2016	138611	14000

Anhang

311	ONE MANCHESTER	ONE-Line	THE ALLIANCE	9706748	2015	147404	13900
312	ONE MILLAU	ONE-Line	THE ALLIANCE	9706736	2015	147404	13900
313	ONE MINATO	ONE-Line	THE ALLIANCE	9805477	2018	147404	13900
314	ONE MUNCHEN	ONE-Line	THE ALLIANCE	9706750	2014	147404	13900
315	ONE STORK	ONE-Line	THE ALLIANCE	9784788	2018	138611	14000
316	OOCL Bangkok	OOCL	Ocean Alliance	9622588	2013	144143	13208
317	OOCL Berlin	OOCL	Ocean Alliance	9622590	2013	144143	13208
318	OOCL Brussels	OOCL	Ocean Alliance	9622605	2013	144143	13208
319	OOCL Chongqing	OOCL	Ocean Alliance	9622617	2013	144143	13208
320	OOCL Egypt	OOCL	Ocean Alliance	9622629	2013	144143	13208
321	OOCL Germany	OOCL	Ocean Alliance	9776183	2017	191374	21413
322	OOCL Hong Kong	OOCL	Ocean Alliance	9776171	2017	191374	21413
323	OOCL Indonesia	OOCL	Ocean Alliance	9776224	2018	191374	21413
324	OOCL Japan	OOCL	Ocean Alliance	9776195	2017	191374	21413
325	OOCL Korea	OOCL	Ocean Alliance	9622631	2014	144143	13208
326	OOCL Malaysia	OOCL	Ocean Alliance	9627978	2013	144342	13208
327	OOCL Poland	OOCL	Ocean Alliance	9627980	2013	144342	13208
328	OOCL Scandinavia	OOCL	Ocean Alliance	9776212	2017	191374	21413
329	OOCL Singapore	OOCL	Ocean Alliance	9628001	2014	144342	13208
330	OOCL United Kingdom	OOCL	Ocean Alliance	9776200	2017	191374	21413
331	Sajir	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708784	2014	150000	14993
332	Salahuddin	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9708796	2015	150000	14993
333	SEASpan BEAUTY	ONE-Line	THE ALLIANCE	9713349	2015	119106	10000
334	SEASpan BELIEF	ONE-Line	THE ALLIANCE	9713351	2019	119106	10000
335	SEASpan BELLWETHER	ONE-Line	THE ALLIANCE	9713363	2015	119241	10100
336	SEASpan BRAVO	ONE-Line	THE ALLIANCE	9685358	2014	119106	10000
337	SEASpan BREEZE	ONE-Line	THE ALLIANCE	9685358	2014	119106	10000
338	SEASpan BRIGHTNESS	ONE-Line	THE ALLIANCE	9685346	2014	119241	10100
339	SEASpan FALCON	ONE-Line	THE ALLIANCE	9793909	2018	132712	11923
340	SEASpan HARRIER	ONE-Line	THE ALLIANCE	9793923	2018	132712	11923
341	SEASpan HUDSON	Yang Ming	THE ALLIANCE	9630418	2015	119241	10100
342	SEASpan OSPREY	ONE-Line	THE ALLIANCE	9786736	2017	132712	11923
343	SEASpan RAPTOR	ONE-Line	THE ALLIANCE	9793911	2018	132712	11923
344	Shanghai Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9501368	2013	142092	13177
345	Tayma	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525895	2012	145528	13500
346	Thalassa Avra	Evergreen	Ocean Alliance	9665633	2014	152344	13800
347	Thalassa Axia	Evergreen	Ocean Alliance	9667186	2014	152344	13800
348	Thalassa Doxa	Evergreen	Ocean Alliance	9667174	2014	152344	13800
349	Thalassa Elpida	Evergreen	Ocean Alliance	9665621	2014	152344	13800
350	Thalassa Hellas	Evergreen	Ocean Alliance	9665592	2013	152344	13800
351	Thalassa Mana	Evergreen	Ocean Alliance	9667150	2014	152344	13800
352	Thalassa Niki	Evergreen	Ocean Alliance	9665645	2014	152344	13800
353	Thalassa Patris	Evergreen	Ocean Alliance	9665607	2013	152344	13800
354	Thalassa Pistis	Evergreen	Ocean Alliance	9665619	2014	152344	13800
355	Thalassa Tyhi	Evergreen	Ocean Alliance	9667162	2014	152344	13800

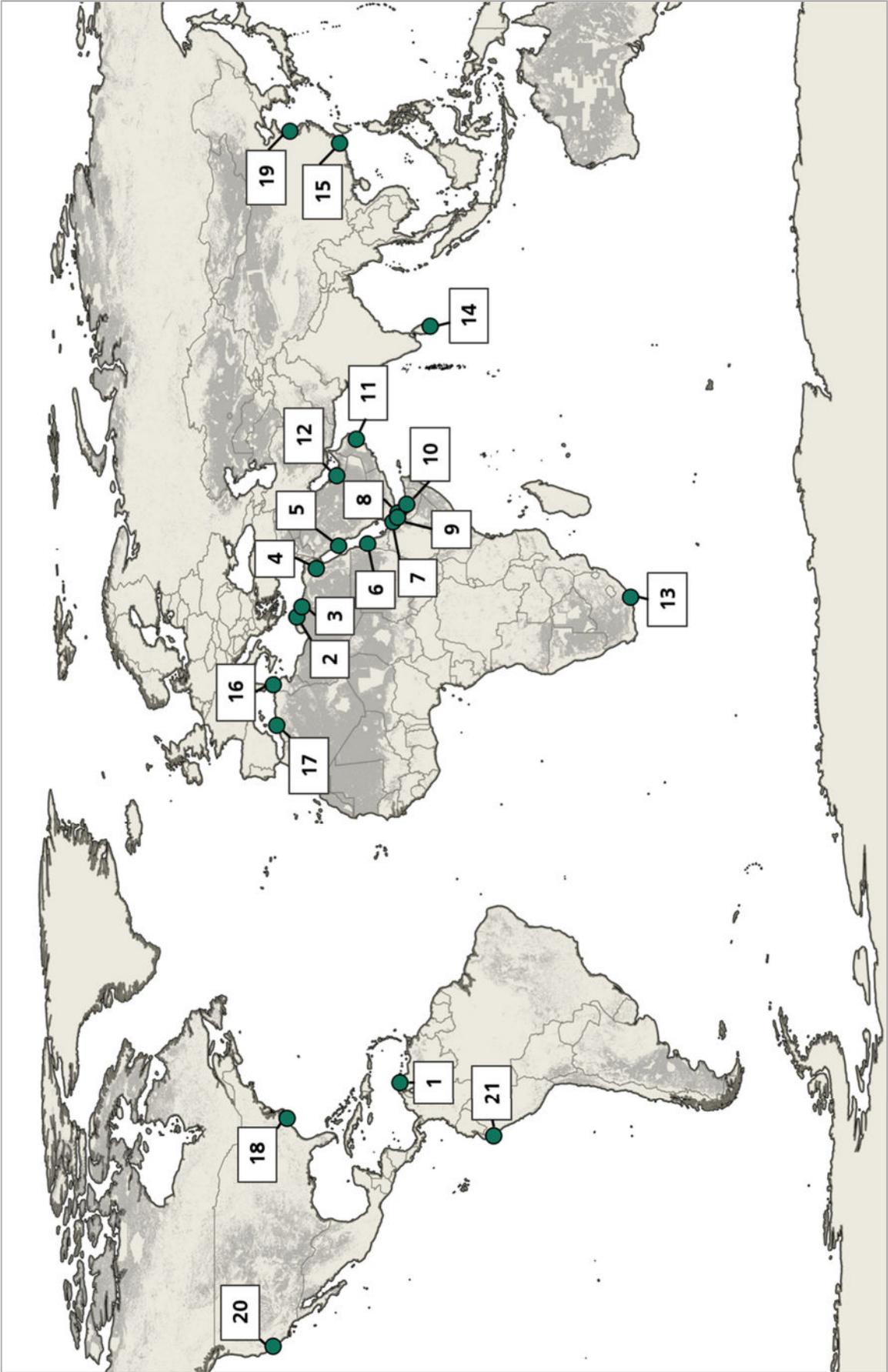
356	Tihama	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9736107	2016	199744	19870
357	Ulsan Express	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9613020	2014	142092	13177
358	Umm Qarn	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9732333	2016	150000	14993
359	Umm Salal	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525857	2011	145528	13500
360	Unayzah	Hapag-Loyd	THE ALLIANCE	9525871	2012	145528	13500
361	YM TOTALITY	Yang Ming	THE ALLIANCE	9860922	2020	132500	12726
362	YM TRIUMPH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9860908	2020	132500	12726
363	YM TRUTH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9860910	2020	132500	12726
364	YM WARMTH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9704647	2015	145560	14080
365	YM WARRANTY	Yang Ming	THE ALLIANCE	9757228	2019	146749	14220
366	YM WELCOME	Yang Ming	THE ALLIANCE	9708459	2016	145730	14198
367	YM WELLBEING	Yang Ming	THE ALLIANCE	9820908	2018	146749	14220
368	YM WELLHEAD	Yang Ming	THE ALLIANCE	9684665	2015	145560	14080
369	YM WELLNESS	Yang Ming	THE ALLIANCE	9704623	2015	145560	14080
370	YM WELLSRING	Yang Ming	THE ALLIANCE	9757230	2019	146749	14220
371	YM WHOLESOME	Yang Ming	THE ALLIANCE	9704611	2015	145560	14080
372	YM WIDTH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9708447	2016	146073	14198
373	YM WIND	Yang Ming	THE ALLIANCE	9708461	2017	145560	14078
374	YM WINDOW	Yang Ming	THE ALLIANCE	9708435	2016	146073	14198
375	YM WINNER	Yang Ming	THE ALLIANCE	9684689	2015	145560	14080
376	YM WISDOM	Yang Ming	THE ALLIANCE	9757216	2019	146749	14220
377	YM WISH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9684641	2015	145560	14080
378	YM WITNESS	Yang Ming	THE ALLIANCE	9704609	2015	145560	14080
379	YM WONDERLAND	Yang Ming	THE ALLIANCE	9820910	2019	146749	14000
380	YM WONDROUS	Yang Ming	THE ALLIANCE	9684677	2015	145560	14080
381	YM WORLD	Yang Ming	THE ALLIANCE	9684653	2015	145560	14080
382	YM WORTH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9704635	2015	145560	14080
383	YM WREATH	Yang Ming	THE ALLIANCE	9708473	2017	145560	14078
384	ZENITH LUMOS	ONE-Line	THE ALLIANCE	9864215	2020	150000	14952

Anhang E – Identifizierte Häfen

Hafen	Land	Lat.	Long.	Hafen	Land	Lat.	Long.
Aarhus	Dänemark	56.1570	10.2467	Malta Freeport	Malta	35.8199	14.5374
Abu Dhabi	VAE*	24.5307	54.3820	Marsaxlokk	Malta	35.8213	14.5442
Algeciras	Spanien	36.1398	-5.4366	Miami	USA	25.7679	-80.1650
Istanbul	Türkei	40.9645	28.6691	Mundra	Indien	26.5283	-78.7652
Antwerp	Belgien	51.2804	4.2413	Nansha Port	China	22.6321	113.6872
Aqaba	Jordanien	29.4682	34.9752	New York	USA	40.6708	-74.0810
Ba Ria	Vietnam	10.5108	107.0106	Newark	USA	40.6615	-74.1462
Baltimore	USA	39.2567	-76.5467	Nhava Sheva	Indien	18.9498	72.9445
Baltiysk	Russland	54.7041	20.4603	Ningbo	China	29.7762	122.0147
Barcelona	Spanien	41.3087	2.1465	Norfolk	UK	36.9248	-76.3308
Beirut	Libanon	33.9095	35.5348	Oakland	USA	37.7947	-122.3113
Bremerhaven	Deutschland	53.5907	8.5237	Panama Canal	Panama	8.9615	-79.5733
Busan	Südkorea	35.0766	128.8293	Piraeus	Griechenland	37.9560	23.5867
Canakkale	Türkei	40.1475	26.3933	Port Klang	Malaysia	2.9461	101.3000
Charleston	USA	32.8355	-79.8912	Port Said East	Ägypten	31.2093	32.3537
Colombo	Sri Lanka	6.9461	79.8320	Port Tangier Mediterranee	Marokko	35.7871	-5.8014
Dalian	China	39.0014	121.8806	Prince Rupert	Kanada	54.2862	-130.3612
Dammam	Saudi-Arabien	26.5071	50.1963	Qingdao	China	36.0114	120.2115
Dschibuti	Dschibuti	11.6049	43.1361	Qinzhou	China	21.6786	108.6380
Felixstowe	UK	51.9609	1.2911	Rijeka	Kroatien	45.3193	14.4539
Fos sur Mer	Frankreich	43.4176	4.8362	Rotterdam	Niederlanden	51.9597	4.0540
Freeport	Bahamas	26.5244	-78.7669	Salalah	Oman	16.9460	54.0087
Gdansk	Polen	54.3933	18.6678	Savannah	USA	32.1253	-81.1351
Genoa	Italien	44.4047	8.9142	Seattle	USA	47.5969	-122.3426
Gioia Tauro	Italien	38.4567	15.9023	Shanghai	China	31.3375	121.6614
Göteborg	Schweden	57.6892	11.8698	Shekou	China	22.4663	113.8828
Gwangyang	Südkorea	34.9056	127.6711	Sines	Portugal	37.9327	-8.8481
Hai Phong	Vietnam	20.7983	106.9094	Singapur	Singapur	1.2729	103.7828
Haifa	Israel	32.8188	35.0127	Sokhna Port	Ägypten	29.6521	32.3526
Hamad	Israel	25.0159	51.6034	Suez Canal	Ägypten	31.2162	32.3547
Hamburg	Deutschland	53.5352	9.9055	Taipei Port	Taiwan	25.1630	121.3875
Hong Kong	China	22.3475	114.1187	Tangier	Marokko	35.7871	-5.8014
Izmit Korfezi	Türkei	40.7651	29.7423	Tanjung Pelepas	Malaysia	1.3582	103.5448
Jebel Ali	VAE*	24.9926	55.0580	Tekirdag	Türkei	40.9026	27.4699
Dschidda	Saudi-Arabien	21.4883	39.1520	Triest	Italien	45.6335	13.7591
Jubail	Saudi-Arabien	27.0271	49.6810	Ulsan	Südkorea	35.5175	129.3794
Kaohsiung	Taiwan	22.5464	120.3268	Valencia	Spanien	39.4391	-0.3162
Karachi	Pakistan	24.8038	66.9872	Vancouver	Kanada	49.2898	-123.0959
Khalifa Port	VAE*	24.8075	54.6516	Vostochniy Port	Russland	42.7350	133.0770
King Abdullah	Saudi-Arabien	22.5254	39.0896	Vung Tau	Vietnam	10.5128	107.0099
Koper	Slowenien	45.5525	13.7324	Wilhelmshaven	Deutschland	53.5915	8.1541
Kwangyang	Südkorea	34.9082	127.6805	Xiamen	China	24.5157	118.0777
La Spezia	Italien	44.1091	9.8422	Xingang	Taiwan	38.9865	117.7350
Laem Chabang	Thailand	13.0544	100.8991	Yantian	China	22.5743	114.2650
Le Havre	Frankreich	49.4599	0.1458	Yokohama	Japan	35.4508	139.6592
Lianyungang	China	34.7487	119.4355	Zeebrugge	Belgien	51.3381	3.2136
London	UK	51.5032	0.4971	Zhoushan	China	30.0390	121.9830
Los Angeles	USA	33.7230	-118.2610				

*Vereinigte Arabische Emirate

Anhang F – Standorte der Kraftstoffproduktionsanlagen, bzw. Betankungspunkte



Anhang G – Identifizierte Verkehrslast und auf Länder zugeordneter Kraftstoffbedarf

