Abschlussbericht zum Promotionsstipendium

der Gesellschaft für Energie- und Klimaschutz Schleswig-Holstein an der Europa-Universität Flensburg im Fachbereich Energie- und Umweltmanagement

---

6. Februar 2023

Stipendiatin:	Franziska Dettner
	(Europa-Universität Flensburg)
	Schleswig-Holstein GmbH
Betreuer:	Prof. Dr. Olav Hohmeyer
	(Europa-Universität Flensburg)
Stipendiendauer:	01. Januar 2022 - 31. Dezember 2022
Vorgelegt bei:	Gesellschaft für Energie- und Klimaschutz

Rahmen

Der vorliegende Bericht beschreibt die Arbeiten innerhalb der Förderperiode vom 01/01/2022 bis 31/12/2022 des von der Gesellschaft für Energie- und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) geförderten Promotionsvorhabens von Franziska Dettner an der Europa-Universität Flensburg. Das einjährige Promotionsstipendium schließt an das ebenfalls durch die EKSH geförderte Hochschule-Wirtschaft-Transfer (HWT) Projekt (Laufzeit 01/01/2020 bis 31/12/2021) *Klimaneutrale Schifffahrt für Schleswig-Holstein* an. Das Promotionsstipendium wurde von dem Interdisziplinären Institut für Umwelt-, Sozial-, und Humanwissenschaften im Fachbereich Energie- und Umweltmanagement an der Europa Universität Flensburg beantragt.

Das übergeordnete Ziel der Promotion ist der regionale (und globale) Umwelt- und Klimaschutz. Angestrebt wird eine kumulative Dissertation. Im Rahmen des einjährigen Promotionsstipendiums wurden die Ergebnisse des HWT Projektes als wissenschaftliche Veröffentlichung aufgearbeitet und weiterentwickelt. Der Forschungsschwerpunkt liegt besonders auf der (maritimen) Energiewende sowie dem Umwelt-ökonomischen Mittel der externen Kosten und wird in verschiedenen Fallstudien eingehend untersucht. Der ursprüngliche Titel *State-of-the-art external cost modelling in a broader valuation context* wird durch den derzeitigen Arbeitstitel *Energy Transition and External Costs: A Case Study Analysis* ersetzt.

Der vorliegende Abschlussbericht gibt einen Überblick über die veröffentlichten Publikationen und vermittelt einen ersten Überblick über die verbindenden Forschungsbereiche der kumulativen Dissertation. Abbildung 1 zeigt den Überblick der entstandenen Veröffentlichungen innerhalb des HWT-Projekt Zeitraums sowie die Weiterentwicklung der Ergebnisse des Projektes als Veröffentlichungen innerhalb des Stipendienjahres.

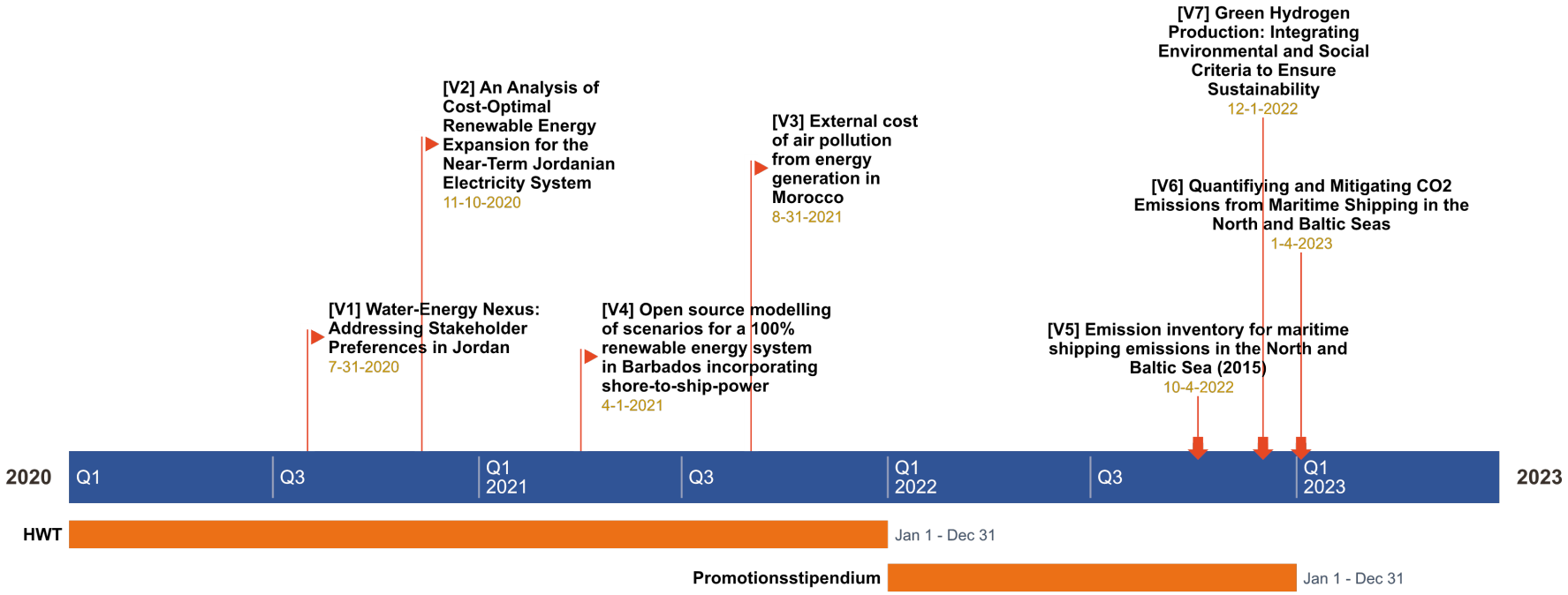

Abbildung 1: Chronologie der Veröffentlichungen innerhalb des HWT Projektes sowie innerhalb des Stipendienjahres .

Zusammenfassung

Um die globale Erwärmung auf 1.5°C zu begrenzen, sind rasche und umfassende Mitigationsmaßnahmen in allen Treibhausgas emittierenden Sektoren erforderlich. In verschiedenen Fallstudien wurde unter anderem die Bedeutung des Energiesystemdesigns herausgearbeitet, die sozialen Kosten (= externe + interne Kosten) quantifiziert und die Relevanz der Emissionsquantifizierung diskutiert. Die Ergebnisse werden im folgenden als Thesen zusammen gefasst. Die entsprechenden Veröffentlichungen sind in 4.3 aufgeführt und den jeweiligen Thesen durch [V1-7] zugeordnet.

- Technologische Lösungen und Mitigationsmaßnahmen im maritimen Sektor werden nicht ausreichen, um das vom Pariser Klimaabkommen gesetzte 1.5 °C Ziel zu erreichen und die Folgen der Klimaerwärmung zu begrenzen. Eine detaillierte Emissionquantifizierung ist notwendig zur Bewertung von politischen, technischen und operativen Mitigationsoptionen. [V5], [V6]

- Die Vermeidung von Kohlenstoff Lock-In Effekten kann teilweise durch Greenfield Planning Ansätze vermieden werden. Die Ergebnisse einer offenen Systemanalyse und Modellierung des Energiesystems aus Jordanien zeigen, dass es sogar teilweise ökonomisch sinnvoller sein kann getätigte Investitionen in fossile Infrastrukturen ruhen zu lassen und zusätzlich in erneuerbare zu investieren. [V1], [V2]

- Die externen Kosten von fossiler Energieerzeugung durch Luftverschmutzung befinden sich (teilweise) auf einem hohen Niveau, Kosten die größtenteils durch die Gesundheitssysteme sowie die Bevölkerung selbst getragen werden. Selbst ohne die Berücksichtigung der externen Kosten des Klimawandels, können die Schäden an der Gesellschaft durch fossile Energien enorm sein (vgl. [V3].) [V6]

- Eine gerechte Energiewende kann nur durch die Integration von sozial-ökologischen Nachhaltigkeitskriterien gelingen, da neben dem, durch Treibhausgase fossierten Klimawandel, auch Luftschaftstoffe zu beispielsweise dem Artensterben und Biodiversitätsverlust beitragen und somit die Lebensgrundlage von zahlreichen Spezien, inklusive der unseren, bedrohen. [V1], [V7]

1 Einleitung

Es gibt unterschiedliche Elemente, die im Rahmen einer gerechten Energiewende beachtet werden müssen. Betrachtet man die politische Zielsetzung der vereinten Nationen, formuliert als 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung, welche weltweit der Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene dienen sollen, ergeben sich fünf übergeordnete Themenkomplexe: Klimawandel, Luftverschmutzung, Energiesicherheit, wirtschaftlicher Nutzen und soziale Gerechtigkeit. Das Dissertationsvorhaben umfasst und untersucht verschiedene Elemente dieses Themenkomplexes und betrachtet dabei besonders die sozialen Kosten der Energieerzeugung und des Verbrauchs. Methodisch genutzte Elemente sind hierbei die Emissionsmodellierung, Transformationsforschung des Energiesektors, gesellschaftliche Analysen und energiepolitische Regulierungsvorschläge. Im folgenden werden die Elemente einer gerechten Energiewende stichpunktartig erläutert und der Themenkomplex der externen Kosten eingeführt.

- **Klimawandel** Die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle und Öl ist die Hauptquelle für Treibhausgasemissionen, die den Klimawandel vorantreiben. Eine rasche Umstellung auf erneuerbare Energiequellen ist notwendig, um die negativen Auswirkungen des Klimawandels, wie häufigere und schwerere Hitzewellen, Dürren und Naturkatastrophen, abzumildern. Der beispiellose Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen, insbesondere aus fossilen Brennstoffen, hat seit 1900 erheblich zugenommen. Seit 1970 haben die CO_2 Emissionen um etwa 90% zugenommen, wobei die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und aus industriellen Prozessen etwa 78% des gesamten Anstiegs der Treibhausgasemissionen von 1970 bis 2011 ausmachen **iea**.

- **Luftverschmutzung** Besonders bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe werden auch schädliche Schadstoffe wie Feinstaub (PM), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxide (NO_x) in die Luft freigesetzt, die schwerwiegende negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können. Wie andere Formen der Energieerzeugung können auch die Herstellung und Verwendung von E-Kraftstoffen (auch als elektrisch erzeugte Kraftstoffe bezeichnet) zu Luftverschmutzung führen. Die spezifischen Luftschadstoffe, die bei der Herstellung und Nutzung von E-Kraftstoffen emittiert

werden, können je nach Technologie und Energiequelle, die zur Stromerzeugung verwendet wird, variieren. Die Nutzung von erneuerbaren Energien kann dazu beitragen, die Luftverschmutzung zu verringern und die öffentliche Gesundheit zu verbessern.

- **Energiesicherheit** Die Abhängigkeit von einer einzigen oder wenigen Energiequellen kann ein Land anfällig für Preisschwankungen und Versorgungsunterbrechungen machen. Ein diversifizierter Energiemix, der insbesondere erneuerbare Energiequellen umfasst, kann die Energiesicherheit verbessern und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern.

- **Wirtschaftlicher Nutzen** Die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen kann neue wirtschaftliche Möglichkeiten schaffen und das Wirtschaftswachstum ankurbeln sowie die langfristigen Energiekosten senken.

- **Soziale Gerechtigkeit** Eine gerechte Energiewende ist integrativ und berücksichtigt die Bedürfnisse und Interessen aller Mitglieder der Gesellschaft, einschließlich benachteiligter und marginalisierter Gemeinschaften. Die Gewährleistung einer fairen und gerechten Verteilung der Vorteile und Lasten der Energiewende ist eine wesentliche Voraussetzung für ihren Erfolg.

- **Soziale Kosten** Die sozialen Kosten der Energie beziehen sich auf die negativen externen Effekte, die mit der Produktion und dem Verbrauch von Energie verbunden sind, wie Luftverschmutzung und Klimawandel. Diese Kosten spiegeln sich nicht im Marktpreis der Energie wieder, können aber erhebliche Auswirkungen auf die Gesellschaft und die Umwelt haben.

Durch die Internalisierung der sozialen Kosten können mehrere Aspekte der gerechten Energiewende aufgegriffen werden. So kann beispielsweise die Bepreisung von externen Effekten, wie beispielsweise die mittlerweile wirtschaftlich greifbaren Kosten von Kohlenstoffzertifikaten, im tatsächlichen Marktpreis die Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Energien erhöht werden. Die erhöhte Wettbewerbsfähigkeit kann zu einer effizienteren Ressourcenallokation und einer stärkeren Akzeptanz von erneuerbaren Energietechnologien führen. Zusätzlich wird durch die Internalisierung bei Erzeugern und Verbrauchern ein Anreiz geschaffen, ihre negativen Auswirkungen auf die Umwelt und die öffentliche Gesundheit zu verringern. Weiterhin können durch die Integration der sozialen Kosten die tatsächlichen Energiekosten transparenter gemacht werden, was zu politischen Entscheidungen und zur Förderung nachhaltigerer Energiepraktiken beitragen kann. Gesamtgesellschaftlich wird eine größere Fairness sichergestellt, sodass diejenigen, die von der Energieerzeugung und dem Energieverbrauch (heute) profitieren, auch die Kosten tragen, anstatt sie auf die (zivile) Gesellschaft und künftige Generationen abzuwälzen.

2 Forschungsdesign und Methode

Angestrebt wird eine kumulative Dissertation, die sich aus Arbeiten zusammensetzt, die in akademischen Zeitschriften veröffentlicht wurden oder sich derzeit (01/2023) im Review befinden (siehe section 4.3). Die wissenschaftlichen Methoden sind den entsprechenden Veröffentlichungen zu entnehmen. Es werden hauptsächlich (offene) Energiesystemmodelle und Literaturanalysen verwendet. In [V2] und [V4] werden unter anderem 100% erneuerbare Energiesysteme und kostenoptimalen Energiesystem modelliert und analysiert. [V4] integriert zusätzlich die Elektrifizierung des Personenverkehrs sowie den Strombedarfs von Kreuzfahrtschiffen im Hafen in die Energiesystemmodelle.

Die externen Effekte und damit verbundenen Kosten der Luftverschmutzung durch fossile Kraftwerke in Marokko wurden in [V3] detailliert berechnet und die Größenordnung von externen Kosten im Vergleich zu Stromgestehungskosten aufgezeigt. Die externen Effekte der CO_2 Emissionen und der dadurch forcierten globalen Erwärmung werden anhand von Umweltschadenskosten in [V6] für die Schifffahrt auf Nord- und Ostsee quantifiziert. Vorangegangen ist eine detaillierte, open-source basierte Emissionsmodellierung der Schifffahrtsemissionen (einschließlich Luftschadstoffemissionen) [V5].

Ein Exkurs in den zukunftsträchtigen Energieträger Wasserstoff zeigt anhand von Experteninterviews und einer umfangreichen Literaturanalyse die Relevanz für Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von allen Energieträgern für die Sicherstellung einer sozial-ökologisch gerechten Energiewende [V7].

3 Ergebnisse

3.1 CO_2 Emissionen und Minderungspotential in der Seeschifffahrt

Die europäische Seeschifffahrt spielt eine entscheidende Rolle bei der Verringerung der CO_2 Emissionen, um das im Pariser Abkommen festgelegte 1.5 °C Ziel zu erreichen. Veröffentlichung [V5] präsentiert ein zeitlich und räumlich hoch aufgelöstes, öffentlich zugängliches Emissionsinventar von Schifffahrtsemissionen auf der Nord- und Ostsee für das Jahr 2015, welches unter Verwendung aktueller Emissionsfaktoren und Schiffsaktivitätsdaten (2015) erstellt wurde. Das Inventar umfasst Seeschiffe über 100 GT (Gross Tonnage), die bei der Internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO) registriert sind und auf der Nord- und Ostsee, innerhalb des Europäischen Schwefel-Emissionskontrollgebiet (SECA), verkehren. Für die Erstellung des Inventars wurde ein Bottom-up-Ansatz gewählt, der die Emissionsmengen der Luftschadstoffe CO_2, NO_x, SO_2, $PM_{2.5}$, CO, BC, Asche, NMVOC und POA sowie den geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoff- und Energieverbrauch berechnet. Die Emissions-, Energie- und Kraftstoffverbrauchsgrößen werden über den gesamten Lebenszyklus *well-to-tank* und *tank-to-propeller* für Hilfsmotoren und Hauptmaschine der Schiffe bereitgestellt. Die georeferenzierten Daten werden in einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten bereitgestellt.

So belaufen sich die CO_2 Emissionen in der Nord- und Ostsee in 2015 auf 34,931.98 Gg. Die Schadstoffmengen betrachteten Luftschadstoffe sind im veröffentlichten Datensatz [V5] sowie dem Abschlussbericht des HWT-Projektes zu entnehmen.

In Veröffentlichung [V6] wird daran anschließend die Nordeuropäische Schifffahrt in ein Kohlenstoffbudget im Rahmen des 1.5°C Ziels eingeordnet. Die globalen Kohlenstoffemissionen aus der internationalen Seeschifffahrt betrugen im Jahr 2015 998,000 Gg (Durchschnitt der Werte aus IMO (2020) und IMO (2015)). Die Nordeuropäischen Seeschifffahrt CO_2 Emissionsmengen aus Jalkanen, Johansson und Kukkonen (2016) (35,740 Gg), Johansson et al. (2013) und Johansson, Jalkanen und Kukkonen (2017) (43,121 Gg bzw. 48,030 Gg), Schwarzkopf et al. (2021) (44,886 Gg) und der Ergebnisse aus [V5] (34,932 Gg) wurden ins Verhältnis zu den globalen Emissionswerten der Schifffahrt gesetzt. Auf der Grundlage

der angegebenen Emissionsmengen entspricht der Anteil der Seeschifffahrt in Nord- und Ostsee zusammen einem Anteil von 3.5 bis 4.8% der globalen maritimen CO_2 Emissionen. Für die weitere Berechnung des Kohlenstoffbudgets wurde ein zentraler Wert von 4.1% gewählt, der sich aus dem von Traut et al. (2015) vorgeschlagenen globalen maritimen Kohlenstoffbudget von 18 Gt errechnet. Daraus ergibt sich ein Budget von 0.75 Gt (745,645.16 Gg) für die internationale Seeschifffahrt in Nord- und Ostsee von 2011 bis 2100. Es gibt verschiedene Pfade der potenziellen CO_2 Emissionen im Laufe der Zeit, die demselben Budget entsprechen. [V6] geht davon aus, dass die CO_2 Emissionen in Nord- und Ostsee im Jahr 2011 das berechnete 1.5°C Budget enthalten, welches dann im Laufe der Zeit linear abnimmt (Budget 2011-2100 analog zu Traut et al. (2015)). Die Entwicklung des kumulierten Budgets zeigt, dass selbst unter konservativen Annahmen mit einer jährlichen Emissionsmenge von 34,932 Gg, wie berechnet in [V5], ab 2011, ohne Entwicklungen im Schiffsbereich, das CO_2 Budget bereits im Jahr 2033 aufgebraucht sein wird. Höhere Emissionsmengen, wie sie z.B. von Schwarzkopf et al. (2021) modelliert wurden, führen zu einer deutlich früheren Ausschöpfung des Budgets (2028).

Zusätzlich analysiert [V6] unter anderem das Kohlenstoffminderungspotenzial von E-Methanol als zukünftigem Schiffskraftstoff. Um dies beurteilen zu können müssen die CO_2 Emissionen über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden. Auf der Grundlage der gewählten Szenario Annahmen (Austausch der Schiffe durch E-Methanol betriebene Schiffe nach Ablauf der Lebensdauer von 25 Jahren) ist bis 2030 eine CO_2 Reduktion von etwa 45% und rund 90% bis 2040 möglich, MPV-, RoPax- und RoRo-Schiffe bieten mit 57%, 50% respektive 49% die größten Reduktionspotentiale.

Beide Veröffentlichungen [V5] und [V6] zeigen die dringende Notwendigkeit der Umsetzung von operativen und technologischen Maßnahmen zur Minderung von CO_2 Emissionen in der Seeschifffahrt. Es wird deutlich, dass technologische Veränderungen nicht ausreichen, um eine frühzeitige Erschöpfung des dem Seeschifffahrtssektor in der Nord- und Ostsee zugewiesenen Kohlenstoffbudgets zu vermeiden, und die Energiewende an Land aufgrund der großen Mengen an (erneuerbarer) Energie, die für kohlenstoffarme Antriebstechnologien und Kraftstoffe benötigt werden, starke Auswirkungen auf die Gesamtemissionen der Schifffahrt hat. Bei der zukünftigen Gestaltung eines kohlenstoffneutralen Seeverkehrssektors müssen zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen der Schiffsgeschwindigkeit, dem Umfang und der Struktur der Verkehrsnachfrage, dem Innovationstempo bei Antriebstechnologien und Kraftstoffen sowie die mit den Technologien verbundenen Kosten berücksichtigt werden. Es müssen, in naher Zukunft, gebundene Emissionen (Lock-in Effekte), die aus langjährigen Investitionen und damit verbundenen Investitionsentscheidungen im Seeverkehrssektor resultieren, vermieden werden, um zu verhindern, dass der Sektor sein Kohlenstoffbudget vorzeitig aufbraucht.

3.2 Externe Kosten von Luftverschmutzung und Klimawandel

Die externen Kosten der Energieerzeugung setzen sich aus drei Hauptkomponenten zusammen: den Kosten für die Schädigung des Klimas durch Treibhausgasemissionen, den Kosten für die Behandlung von Gesundheitszuständen sowie den Schäden an der natürlichen und bebauten Umwelt aufgrund von Luftschadstoffen und den nicht umweltbezogenen sozialen Kosten für nicht-fossile Stromerzeugungstechnologien Bickel et al., 2005. Der größte Anteil der externen Kosten der Energieerzeugung (etwa 95%) entfällt auf die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit, wie unter anderem in Hidden Costs of Energy (CHE, Commitee on Health, Environment and Other External Costs and BEnefits of Energy Production and Consumption, 2010), ExternE (Friedrich und Bickel, 2005), Hohmeyer, 1988 und Samadi, 2017 dargelegt.

In Veröffentlichung [V6] werden die externen Kosten der durch die Schifffahrt verursachten CO_2 Emissionen berechnet. In der Seeschifffahrt erhöhen langjährige Anlagen die Wahrscheinlichkeit eines hohen Niveaus an gebundenen Emissionen. Ein Kohlenstoffpreis (für die Integration der Schifffahrt in den Europäischen Emissionshandel, EU-ETS), der nahe an der tatsächlichen Schadenshöhe (externen Kosten) liegt, ist notwendig, um Anreize zu schaffen, den negativen Effekten entgegenzuwirken. Die Kohlenstoffpreise in der *high* Preisannahme (vgl. [V6]) sind bereits höher als die Schadenskosten für die heutige Generation, betragen aber nur 40% der Schadenskosten, wenn das Wohlergehen künftiger Generationen berücksichtigt wird. Das Wohlergehen und die Wohlfahrt künftiger Generationen müssen unbedingt berücksichtigt werden, da die Folgen des Klimawandels in erster Linie von künftigen Generationen getragen werden. Der von Pietzcker, Osorio und Rodrigues (2021) vorgeschlagene Kohlenstoffpreis (zwischen 120-300 EUR_{2020}/t_{CO2}) ebenso wie die von UBA (2020) vorgestellten Schadenskosten (zwischen 250-765 EUR_{2020}/t_{CO2}) sind erste Anhaltspunkte für die Festlegung eines Kohlenstoffpreises für CO_2 Zertifikate. Auf der Grundlage der Ergebnisse von [V5] und [V6] wird empfohlen, den Kohlenstoffpreis in einem Emissionshandelssystem auf mindestens 300 EUR/t_{CO2} festzulegen [V6]. Aus der UBA (2020) geht jedoch hervor, dass zur Erfassung aller externen Effekte ein Preis nahe den tatsächlichen Schadenskosten von bis zu 765 EUR/t_{CO2}UBA, 2020 ratsam ist.

Das Emissionsinventar aus [V5] kann auch dazu verwendet werden, die gesundheitlichen Auswirkungen der Emissionen des Seeverkehrs zu quantifizieren und zu bewerten. Dafür ist jedoch eine umfangreiche Dispersionsmodellierung notwendig, um zu bewerten wie hoch die Schadstoffkonzentration an Land aufgrund von maritimen Schifffahrtsemissionen tatsächlich ist.

Als Beispiel für die externen Kosten der Energieerzeugung werden diese für das hauptsächlich von fossilen Energieträgern (Kohle) getragene Energiesystem von Marokko betrachtet [V3].

Die Länder des Nahen Ostens und Nordafrikas sind besonders anfällig für die Folgen der globalen Erwärmung. Einige dieser Länder, wie zum Beispiel Marokko, befinden sich zudem an einem energiepolitischen Scheideweg. Die Stromnachfrage in Marokko steigt, und das Land bemüht sich, unabhängiger von Energieimporten zu werden. Außerdem gilt die Luftqualität in Marokko als *mäßig bedenklich*, da die $PM_{2.5}$ Jahresmittelkonzentration von 33 $\mu g/m^3$ deutlich über dem empfohlenen Höchstwert der WHO (10 $\mu g/m^3$) liegt WHO, 2013. Erneuerbare Energien könnten die Lösung sein, um die schädliche Luftverschmutzung in Marokko zu reduzieren, den Ausstoß von klimaschädlichen Treibhausgasen zu verringen Energieabhängigkeit zu verringern.

Im Gegensatz zu dem generischen Ansatz der Umweltschadenskosten, welche feste Kostensätze pro Tonne Schadstoff angeben, wurde in [V3] der Impact-Pathway-Approach (IPA) verwendet. Dieser wurde im Rahmen einer EU-finanzierten Projektreihe (ExternE) von Anfang der 1990er Jahre bis 2005 entwickelt. Der IPA wird zur Berechnung externer Kosten verwendet und wurde in einer Reihe prominenter Studien wie NEEDS, 2009, Hope, Chris, 2006, EC, 2019 sowie bei der Ausarbeitung von EU-Strategien zur Bekämpfung der Versauerung und der Festlegung von Luftqualitätsgrenzwerten für PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) und andere Schadstoffe (EC, 2018) eingesetzt. Der IPA ist eine Bottom-up-Methode zur Ermittlung der Kosten von Umweltschäden, die als genauester Indikator für externe Kosten gelten. In [V3] werden die vier Schritte der IPA durchlaufen: 1) Quantifikation der Emissionen unter Angabe der Technologie und des Standorts pro Jahr; 2) Ausbreitung der Schadstoffe, unter Verwendung eines atmosphärischen Ausbreitungsmodells zur Bestimmung des Anstiegs der Schadstoffkonzentration am Standort des Empfängers; 3) Dosis-Wirkungs-Funktion, die die Schadstoffkonzentration an einem bestimmten Standort mit derjenigen am Rezeptor selbst verbindet, was zu Krankheitsbildern pro Rezeptorstandort führt, die sich aus den Emissionen der Quelle ergeben; und 4) monetäre Bewertung, die Anwendung von vorher festgelegten Werten (Literatur-basiert) für jedes Krankheitsbild, um die (wirtschaftlichen) Kosten zu bestimmen.

Die detaillierte Quantifizierung der externen Kosten ist vor allem zur Sichtbarmachung des Schadens erforderlich. Im Gegensatz zu den Folgen des Klimawandels, fallen die externen Effekte und damit verbundenen Kosten von Luftverschmutzung meist im Land an, in welchem die Verschmutzung auf hervorgerufen wird. Die in [V3] vorgestellte Berechnung der Kosten für die Schädigung der menschlichen Gesundheit für das marokkanische Energiesystem im Jahr 2015 zeigt diese Größenordnung. Die externen Gesamtkosten belaufen sich für das Jahr 2015 auf 8.4 Milliarden bis 18 Milliarden EUR (je nach Kostenannahme),

was 18% des marokkanischen BIP (2015) entspricht. Um die Größenordnung der durch Luftverschmutzung verursachten Gesundheitskosten einzuuordnen, wurden die Umweltschadenskosten der CO_2 Emissionen anhand der EPA-Emissionsfaktoren (EPA, 1998, EPA, 2010) ermittelt. Basierend auf dem Umweltschadenskostenansatz der UBA, 2020 sowie von ExternE (Friedrich und Bickel, 2005) resultieren zusätzlich 3 Milliarden EUR_{2015} respektive 580 Millionen EUR_{2015} Schadenskosten durch CO_2 Emissionen.

3.3 Energiesystemmodellierung für 100% Erneuerbare Energiesysteme

Die Modellierung von Energiesystemen ist ein nützliches Instrument, um die möglichen Auswirkungen verschiedener energiepolitischer Maßnahmen und Technologien auf das Elektrizitätssystem zu verstehen. Durch die Simulation verschiedener Szenarien und Technologien können politische Entscheidungsträger und Analysten die mit verschiedenen Entscheidungen verbundenen Kompromisse verstehen und die kosteneffizientesten Wege zur Erreichung bestimmter Ziele, wie z. B. den Übergang zu 100% erneuerbarer Energie, ermitteln. Open-Source-Tools zur Modellierung von Energiesystemen können für diesen Zweck besonders nützlich sein, da sie transparent sind und leicht geändert und aktualisiert werden können, wenn neue Daten verfügbar werden. Dies kann dazu beitragen, dass die Modellierung genau und aktuell ist, und kann die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren der Energiewende erleichtern.

Als Fallstudien werden diesbezüglich der Energiesektor in Jordanien [V2] und Barbados [V4] betrachtet. Zusätzlich wird in Jordanien, einem der wasserärmsten Ländern der Welt, der Wassersektor und in Barbados der Personennahverkehr und die Kreuzfahrtindustrie (Landstromanschlüsse) in die Modellierung integriert.

Jordanien befindet sich inmitten eines sich verändernden Umfelds, das durch den Klimawandel, politische Herausforderungen, eine schnell wachsende Wirtschaft und sozioökonomischem Druck geprägt ist. Wie andere Länder des Nahen Ostens und Nordafrikas steht auch Jordanien vor einer Reihe von Herausforderungen im Zusammenhang mit der Elektrizitätsversorgung, wie z. B. einer steigenden Energienachfrage, einer hohen Abhängigkeit von Importen fossiler Brennstoffe und der Verwaltung lokaler, fossiler und erneuerbarer Ressourcen (Hilpert, Dettner und Al-Salaymeh (2020)). In [V2] wird eine Analyse auf der Grundlage eines Open-Source-Optimierungsmodells vorgestellt, mit dem ein kostenoptimaler Ausbau des jordanischen Stromsystems bei steigender Nachfrageprognose bis 2030 unter Verwendung von Pumpspeicherkraftwerken ermittelt und die Kosten verschiedener CO_2 Minderungspfade bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen das große Potenzial der

erneuerbaren Energien für eine kosteneffiziente, umweltfreundliche und energieunabhängige Entwicklung des jordanischen Stromsektors. Ein Anteil von bis zu 50% erneuerbarer Energien kann mit einem nur geringen Anstieg der Stromgestehungskosten 54.42 auf 57.04 US$/MWh erreicht werden. Insbesondere eine Kombination aus Photovoltaik und Pumpspeicherung erwies sich aufgrund der hohen Kosten und verringerten CO_2 Emissionen als überlegene Lösung im Vergleich zum Ausbau der bestehenden, mit Ölschiefer betriebenen, fossilen Kraftwerke. Um einen Anteil von mehr als 50% erneuerbarer Energien am Strommix zu erreichen, ist ein erheblicher Ausbau der Windenergie erforderlich. In einem System mit einem Anteil erneuerbarer Energien von 90% deckt die Windenergie 45% des Bedarfs.

Die hohe Abhängigkeit von importierten Brennstoffen und das Potential der wirtschaftlichen Diversifizierung durch erneuerbare Energien machen Barbados für eine detaillierte Transformationsanalyse besonders interessant. In [V4] wird ein Open-Source-Energiesystemmodell für die Analyse eines zukünftigen barbadischen Energiesystems vorgestellt. Das erstellte Modell wurde in einer Szenarienanalyse mittels eines Greenfield-Planning Ansatzes angewandt, um kostenoptimale und 100% erneuerbare Energiesystemkonfigurationen zu untersuchen. Innerhalb der Szenarien wurde die Elektrifizierung von Privatfahrzeugen und Kreuzfahrtschiffen durch Landstromversorgung modelliert, um deren Auswirkungen auf das Energiesystem und die notwendigen Investitionen in Energiespeicher zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass für die meisten Szenarien für das Energiesystem im Jahr 2030 der Anteil der erneuerbaren Energien bei über 80% im kostenoptimalen Fall liegt, selbst bei steigender Nachfrage. Die Stromgestehungskosten des Systems liegen in den kostenoptimalen Szenarien zwischen 0.17 und 0.36 BBD/kWh (entspricht etwa 0.08 - 0.17 EUR/kWh) und steigen bei Systemen mit einem Anteil von 100% erneuerbarer Energien nur moderat an. Unter der Annahme sinkender Photovoltaik-Investitionskosten können die Systemkosten eines 100%igen Systems niedriger sein als die derzeitigen Kosten. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass Pumpspeicherkraftwerke eine no-regret Option für das Stromsystem in Barbados sind. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse das große Potenzial der erneuerbaren Energien sowie die technische und wirtschaftliche Machbarkeit eines 100%igen erneuerbaren Energiesystems für Barbados und der klimatischen und ökonomischen Co-Benefits.

3.4 Soziale und Umweltökologische Aspekte der Energiewende

Für die Erstellung von Energiesystemmodellen, kann es sinnvoll sein, dass unterschiedliche Interessengruppen an der Entwicklung und Nutzung des Modells mitarbeiten, da es die Integration verschiedener Perspektiven und Fachkenntnisse ermöglicht, was zu umfassenderen und genaueren Modellierungsergebnissen führen kann. Diese Form der *Co-Creation* kann auch dazu beitragen, Vertrauen und Verständnis zwischen den verschiedenen Interessengruppen aufzubauen, was für die erfolgreiche Umsetzung von bspw. energiepolitischen Empfehlungen wichtig sein kann. Darüber hinaus können gemeinsam erstellte Modelle transparenter und umfassender sein, was dazu beitragen kann, dass der Modellierungsprozess und die Ergebnisse weithin verstanden und akzeptiert werden. Besonders relevant wird dies, wenn getroffene Entscheidungen erhebliche Auswirkungen auf verschiedene Gruppen in der Gesellschaft haben.

In Veröffentlichung [V1] werden für den Energie- und Wassersektor in Jordanien mithilfe eines kooperativen Ansatzes Präferenzen für die anschließende Energiesystemmodellierung [V2] identifiziert. In Jordanien birgt der sogenannte Wasser-Energie-Nexus, insbesondere angesichts des Klimawandels, eine Reihe von Herausforderungen. Ein wichtiger Punkt bei der Erkundung von Synergien ist die Identifizierung solcher, sowie die Kommunikation zwischen den Sektoren. In [V1] wird die Bedeutung des Einsatzes eines ko-kreativen Ansatzes zur Lösung gegensätzlicher Ansichten und zur Bewertung der Präferenzen der Interessengruppen im Zusammenhang mit dem Wasser-Energie-Nexus in Jordanien hervorgehoben. Zuerst wurden Kritieren und Zukunftsszenarien für den Energie- und Wassersektor vorgestellt und diskutiert und anschließend anhand von Präferenzkriterien bewertet und Schnittmengen identifiziert. Die Kriterien beschreiben sowohl sozio-ökologische als auch techno-ökonomische Aspekte für beide Systeme. Die Anwendung eines partizipativen Multi-Stakeholder- und Multi-Kriterien-Rahmens auf den Energie-Wasser-Nexus in Jordanien fördert ein klares Verständnis der Positionen der unterschiedlichen Stakeholder-Gruppen. Dieses Verständnis kann die Grundlage für eine gemeinsame Wasser-Energie-Nexus-Politik bilden, die im fortlaufenden Verhandlungsprozess zwischen und innerhalb der nationalen und internationalen Zusammenarbeit genutzt werden kann, sowie für die Förderung und Entwicklung akzeptabler Vorschläge zur Lösung komplexer Probleme für beide Sektoren.

Deutlich wird, dass für das Design zukünftiger Energiesysteme nicht nur ökonomische und technische Aspekte berücksichtigt werden dürfen. Exemplarisch wird in Veröffentlichung [V7] die Produktion des viel diskutierten Energieträgers Wasserstoff analysiert. Es werden sozial-basierte Nachhaltigkeitskriterien aufgestellt, welche auch auf andere Bereiche übertragbar sind. Wasserstoff wird weltweit als möglicher Energieträger der Zukunft diskutiert

und als dringend benötigter Baustein für die CO_2 neutrale Energiewende in schwer mitigierbaren Sektoren zur Abschwächung der Auswirkungen der globalen Erwärmung angesehen. [V7] erstellt messbare Nachhaltigkeitskriterien für die Analyse von Projekten und Strategien zur Erzeugung von grünem Wasserstoff. Auf der Grundlage von Experteninterviews und einer umfassenden Literaturrecherche werden sechs Wirkungskategorien vorgestellt, die eine nachhaltige Wasserstoffproduktion und Strategie berücksichtigen müssen: Energiewende, Umwelt, Grundbedürfnisse, Sozioökonomie, Stromversorgung und Projektplanung. Die Kategorien werden auf sechzehn messbare Nachhaltigkeitskriterien heruntergebrochen, die mit entsprechenden Indikatoren hinterlegt werden. Wirtschaftliche Kosten können nicht das einzige Kriterium sein, um eine gerechte und zukunftsfähige Wasserstoffproduktion zu gewährleisten; soziale Aspekte müssen entlang der gesamten Wertschöpfungskette integriert und berücksichtigt werden. Die Einhaltung der vorgeschlagenen Kriterien kann soziale und ökologische Ungerechtigkeiten bei der Planung von grünen Wasserstoffprojekten vermeiden und erhöht u.a. die soziale Wohlfahrt der betroffenen Bevölkerung. Regelungen wie die Einführung eines CO_2 Zertifikatehandels oder von Luftschadstoffgrenzwerten können zwar dafür sorgen, dass sich die ökonomischen Kosten zu Gunsten der Nachhaltigkeit verschieben, dies garantiert jedoch nicht, dass soziale Faktoren ausreichend berücksichtigt werden und kann weiterhin zu Ungerechtigkeiten führen.

4 Ausblick

Die unterschiedlichen Veröffentlichungen zeigen eine hohe Diversität und betrachten den Themenkomplex der Energiewende unter Berücksichtigung der externen Kosten aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

4.1 Forschung

Die unterschiedlichen Forschungsfelder der kumulative Dissertationsschrift können sich gegenseitig bedingen und miteinander verbunden werden, wobei ein Thema ein anderes beeinflusst oder beeinflussen kann. So können beispielsweise die externen Kosten der Energieerzeugung für die Bepreisung der Kohlenstoffemissionen im Seeverkehr von Bedeutung sein, und der Übergang zu 100% erneuerbaren Energiesystemen unter Berücksichtigung sozialer Aspekte kann Änderungen bei der Modellierung von Energiesystemen mit sich bringen. So ist die Integration von allen Treibhausgas- und Luftschadstoff emittierenden Sektoren in eine Energiesystemmodellierung relevant um Symbiosen und Kontraindikationen zu identifizieren und zu optimieren.

Die Integration von Suffizienz, Resilienz und Kreislaufwirtschaft in bestehende Forschungsthemen ist wichtig für die Schaffung einer nachhaltigen Zukunft. Ein Schwerpunkt auf der Bekämpfung sozialer Ungleichheiten ist ebenfalls notwendig, da Energiekolonialismus und andere Formen der Ausbeutung bestehende Ungerechtigkeiten verschärfen und die Fähigkeit von Kommunen zum Übergang zu einem nachhaltigeren Energiesystem einschränken können.

Die Verwendung externer Kosten, wie die Kosten der Umwelt- und Luftverschmutzung und des Klimawandels, kann ein nützliches Instrument zur Förderung von Nachhaltigkeit und Fairness sein. Die Verteilung dieser Kosten kann jedoch komplex sein, und Lösungen müssen ein Gleichgewicht zwischen der Notwendigkeit rascher Maßnahmen gegen den Klimawandel und der Notwendigkeit, soziale und ökologische Ungerechtigkeiten zu beseitigen, herstellen.

Zentrale Strukturen wie Regierungen und internationale Organisationen können bei der Umsetzung der Ziele eines nachhaltigen Energiesystems eine wichtige Rolle spielen, indem

sie die notwendige Koordinierung und Ressourcen bereitstellen. Demokratische Prozesse können jedoch auch eine Schlüsselrolle spielen, wenn es darum geht, dass Lösungen fair und gerecht sind und die Bedürfnisse aller Beteiligten berücksichtigt werden. In diesem Sinne können sowohl zentrale Strukturen als auch demokratische Prozesse eine ergänzende Rolle bei der Förderung von Suffizienz und Nachhaltigkeit spielen.

4.2 Promotion

Die angestrebte kumulative Promotion ist durch die bisher publizierten Artikel weit vorangeschritten. Ein Rahmenpapier soll im laufenden Jahr 2023 durch (wenn nötig) zusätzliche Forschungsarbeiten ergänzt und fertiggestellt werden.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei der EKSH bedanken, die sowohl mit den HWT-Projekten sowie dem Promotionsstipendium Nachwuchswissenschaftler:innen den Raum und Rahmen geben ihre Expertise zu stärken und eigenständige Forschungserfahrungen zu sammeln. Mein besonderer Dank gilt Dr. Klaus Wortmann und Dr. Thies Popp sowie den anderen EKSH-Stipendiat:innen, die durch das Teilen von Zweifeln, Ideen und Gedanken eine Promotion als machbares und spannendes Projekt erscheinen lassen.

4.3 wissenschaftliche Veröffentlichungen

Veröffentlicht

V1 Komendantova, N.; Marashdeh, L.; Ekenberg, L.; Danielson, M.; Dettner, F.; Hilpert, S.; Wingenbach, C.; Hassouneh, K.; Al-Salaymeh, A. *Water–Energy Nexus: Addressing Stakeholder Preferences in Jordan.* Sustainability 2020, 12, 6168. https://doi.org/10.3390/su12156168

V2 Hilpert, S.; Dettner, F.; Al-Salaymeh, A. *Analysis of Cost-Optimal Renewable Energy Expansion for the Near-Term Jordanian Electricity System.* Sustainability 2020, 12, 9339. https://doi.org/10.3390/su12229339

V3 Dettner, F.; Blohm, M. *External cost of air pollution from energy generation in Morocco.* Renewable and Sustainable Energy Transition 2021, 1, 10002. https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100002

V4 Harewood, A.G.; Dettner, F.; Hilpert, S. *Open source modelling of scenarios for a 100% renewable energy system in Barbados incorporating shore-to-ship power and electric vehicles* Energy for Sustainable Development 2022, 68, 120-130. https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.004

Eingereicht & In Review

V5 Dettner F.; Hilpert, S.; Nagel, R. *Emission inventory for maritime shipping emissions in the North and Baltic Sea (2015)* Preprint: 10.48550/ arXiv.2211.13129

V6 Dettner, F.; Hilpert, S. *Quantifying and Mitigating CO_2 Emissions from Maritime Shipping in the North and Baltic Seas* Transportation Research 2023, In Review.

V7 Blohm, M. ; Dettner, F. *Green Hydrogen Production: Integrating Environmental and Social Criteria to Ensure Sustainability* Smart Energy 2022, In Review.

Literatur

[1] P. Bickel et al. *ExternE Externalities of Energy Methodology 2005 Update*. Jan. 2005. ISBN: 978-92-79-00423-0.

[2] CHE, Commitee on Health, Environment and Other External Costs and BEnefits of Energy Production and Consumption. *Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use*. Pages: 12794. Washington, D.C.: National Academies Press, Mai 2010. ISBN: 978-0-309-14640-1. DOI: 10.17226/12794.

[3] EC. *Application | ExternE - External Costs of Energy*. 2018.

[4] EC. *EUROPA - Environment - Air Pollution - Ambient Air Quality - CAFE Reference Documents*. European Commission, Environment. 2019.

[5] EPA. *Emission Factor Documentation for AP-42 Section 1.3 Fuel Oil Combustion*. Techn. Ber. Morrisville: Environmental Protection Agency, 2010.

[6] EPA. *Emission Factor Documentation for AP-42 Section 1.4 Natural Gas Combustion*. Techn. Ber. Morrisville: Environmental Protection Agency, 1998.

[7] Friedrich und Bickel. *ExternE, Externalities of Energy - Methodology 2005 Update*. Eng. European Commission EU 21951. Luxembourg: European Commission, 2005, S. 270.

[8] Simon Hilpert, Franziska Dettner und Ahmed Al-Salaymeh. „Analysis of Cost-Optimal Renewable Energy Expansion for the Near-Term Jordanian Electricity System“. en. In: *Sustainability* 12.22 (Nov. 2020), S. 9339. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su12229339.

[9] Olav Hohmeyer. „External Effects of Energy Systems“. en. In: *Social Costs of Energy Consumption*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, S. 22–104. ISBN: 978-3-540-19350-0 978-3-642-83499-8. DOI: 10.1007/978-3-642-83499-8_4.

[10] Hope, Chris. „The Marginal Impact of CO2 from PAGE2002: An Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern“. Eng. In: *The Integrated Assessment Journal, Bridging Science & Policy* (2006), S. 15–56.

[11] IMO. *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. ENG. Techn. Ber. London: International Maritime Organization, 2020, S. 327.

[12] IMO. *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*. ENG. Techn. Ber. London: International Maritime Organization, 2015, S. 327.

[13] J.-P. Jalkanen, L. Johansson und J. Kukkonen. „A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas in 2011“. en. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 16.1 (Jan. 2016), S. 71–84. ISSN: 1680-7324. DOI: 10.5194/acp-16-71-2016.

[14] L. Johansson et al. *The evolution of shipping emissions and the costs of recent and forthcoming emission regulations in the northern European emission control area*. preprint. Aerosols/Atmospheric Modelling/Troposphere/Chemistry (chemical composition und reactions), Juni 2013. DOI: 10.5194/acpd-13-16113-2013.

[15] Lasse Johansson, Jukka-Pekka Jalkanen und Jaakko Kukkonen. „Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution“. en. In: *Atmospheric Environment* 167 (Okt. 2017), S. 403–415. ISSN: 13522310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.042.

[16] NEEDS. *New Externalities Development for Sustainability.* Techn. Ber. 2009.

[17] Robert C. Pietzcker, Sebastian Osorio und Renato Rodrigues. „Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector“. en. In: *Applied Energy* 293 (Juli 2021), S. 116914. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116914.

[18] Sascha Samadi. „The Social Costs of Electricity Generation—Categorising Different Types of Costs and Evaluating Their Respective Relevance“. en. In: *Energies* 10.3 (März 2017), S. 356. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10030356.

[19] Daniel A. Schwarzkopf et al. „A ship emission modeling system with scenario capabilities“. en. In: *Atmospheric Environment: X* (Sep. 2021), S. 100132. ISSN: 25901621. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2021.100132.

[20] M. Traut et al. „Emissions budgets for shipping in a 2°C global warming scenario, and implications for operational efficiency“. In: Glasgow: University College London, 2015.

[21] UBA. *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten Kostensätze Stand 12/2020*. Techn. Ber. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2020.

[22] WHO. *Health risks of air pollution in Europe - HRAPIE project, Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. Eng. WHO. Copenhagen: World Health Organisation, 2013.