

IKEM

CAMPFIRE 11.1.3.3

Gesellschaftliche Akzeptanz und praktische Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen im Rostocker Hafen

Oktober 2022

Institut für Klimaschutz,
Energie und Mobilität e.V.

Gesellschaftliche Akzeptanz und praktische Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen im Rostocker

Die Studie im Rahmen des Arbeitspakets CF11.1.3.3 des CAMPFIRE-Projekts, zielt darauf ab, den Mehrwert zu quantifizieren, den Projekte für umweltfreundliche Kraftstoffe gegenüber Business-as-usual-Szenarien bieten. Der Mehrwert bemisst sich aus Faktoren wie dem Beschäftigungspotenzial, der Steigerung der Luftqualität, gesundheitlichen Auswirkungen und Infrastrukturverbesserungen sowie geminderten Treibhausgasemissionen.

CAMPFIRE

Das CAMPFIRE-Bündnis wurde im Rahmen des Förderprogramms „WIR!- Wandel durch Innovation in der Region“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gegründet. Ziel ist die Forschung und Entwicklung neuer High-Tech Energieumwandlungs- und Speichertechnologien für das zukünftige Energiesystem auf der Basis von grünem Ammoniak, und Verwertung von exportfähigen Technologien durch regionale kleine und mittelständige Unternehmen der Region Nord-Ost.

Zitiervorschlag

Belltheus Avdic, Dàmir; Pauleweit, Kathleen; Rossek, Johanna. „Gesellschaftliche Akzeptanz und praktische Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen im Rostocker Hafen“. Berlin: Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität, 31. Oktober 2022.

Förderhinweis

Das dieser Studie zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durch den Ideenwettbewerb „Wasserstoffrepublik Deutschland“ im Rahmen des Leitprojektes TransHyDE gefördert.

Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Leitprojekt
TransHyDE

Disclaimer

Für den Inhalt der Studie zeichnen sich die Studienautor:innen verantwortlich. Der Inhalt stellt nicht zwingend die Auffassung des Auftrag- oder Fördergebers dar.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iv
Einleitung	1
Methode und Vorgehen der Studie.....	2
CAMPFIRE-Umfrage	2
Parameter der Studie	3
Region	4
Motortyp	4
Schiffe	5
Beschäftigungspotenzial	7
Entscheidendes sozioökonomisches und politisches Thema	8
Literaturübersicht	9
Auswirkungen auf den Rostocker Hafen.....	11
CAMPFIRE-Umfrage.....	12
Empfehlungen.....	13
Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen	14
Auswirkungen fossiler Brennstoffe auf die Luftqualität und die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen	15
Auswirkungen von Ammoniak auf die Luftqualität und die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen	16
Freisetzung von Ammoniak: Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen	18
Auswirkungen auf den Rostocker Hafen.....	19
CAMPFIRE-Umfrage.....	20
Empfehlungen.....	21
Infrastruktur	22
Die Anwendungsmöglichkeiten von Ammoniak.....	23
Anpassung der bestehenden Infrastruktur	23
Auswirkungen auf den Rostocker Hafen.....	24
CAMPFIRE-Umfrage.....	25
Empfehlungen.....	25
Treibhausgasemissionen	26
Emissionen und Akzeptanz.....	27
Treibhausgasemissionen durch Ammoniakmotoren.....	27
Stickstoffoxide (NO _x)	28
Distickstoffoxide (N ₂ O).....	28
Wasserstoff (H ₂)	28

Treibhausgasemissionen durch Motoren mit fossilen Brennstoffen.....	28
Kleine Schiffe	29
Große Schiffe.....	29
Auswirkungen auf den Rostocker Hafen.....	29
Empfehlungen.....	30
Fazit	31
Literaturverzeichnis.....	33

Zusammenfassung

Die im Rahmen des CAMPFIRE-Projektes “CF11.1 Ammoniak Rechtsrahmen und Akzeptanz” durchgeführte Studie analysiert die akzeptanzbezogenen Auswirkungen der Einführung von grünem Ammoniak als Schiffstreibstoff im Rostocker Hafen. Die Auswirkungen werden in die Kategorien Beschäftigungspotenzial, Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen, Infrastruktur und Treibhausgasemissionen unterteilt. Die Analyse misst diese Auswirkungen anhand von drei Modellschiffen sowie im Allgemeinen. Die Studie enthält auch die Ergebnisse einer informellen Umfrage, die unter einer Handvoll Vertretern der verschiedenen CAMPFIRE-Projekte durchgeführt wurde.

Was die Auswirkungen auf die Beschäftigung betrifft, so stellt die Studie fest, dass die Einführung von mit ammoniakbetriebenen Schiffen wahrscheinlich zu einer gewissen Verschiebung führen wird, die mehrere Jahre lang zunehmen wird, bevor ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Darüber hinaus wird die Einführung von Ammoniak als Schiffskraftstoff wahrscheinlich finanzielle Kosten verursachen, die sich in einem Rückgang der Wirtschaftstätigkeit und damit der Beschäftigung niederschlagen können. Die strategische Lage Rostocks wird sich wahrscheinlich positiv auf die Zahl der verlorenen und gewonnenen Arbeitsplätze sowie auf die durchschnittlichen Nettolöhne auswirken. Dennoch wird die Beschäftigung ein sensibles Thema bleiben und sollte bei jeder Strategie, die die Akzeptanz des Übergangsprozesses erhöhen soll, eine wichtige Rolle spielen.

Die Luftqualität und die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen ist ebenfalls ein heikles Dossier. Fossile Brennstoffe führen zwar zu Umweltverschmutzungen mit sehr schwerwiegenden Auswirkungen auf die Gesundheit von Organismen und sind im Falle eines Lecks sehr schädlich für Flora und Fauna, aber diese Risiken sind bekannt und vertraut, und es gibt (wenn auch unvollkommene) Mechanismen, um sie zu minimieren und zu bewältigen. Da Ammoniak bei normalen Außentemperaturen und atmosphärischem Druck ein flüchtiges Gas ist, ist die Wahrscheinlichkeit eines Lecks größer und die Gefahr, dass es für lebende Organismen in der unmittelbaren Umgebung giftiger ist. Mit anderen Worten: Die Verhinderung von Leckagen, die Einrichtung zuverlässiger Sicherheitsmechanismen und die Gewährleistung einer angemessenen Ausbildung der Personen, die mit Ammoniak umgehen, sind für die Einführung von Ammoniak als Schiffskraftstoff von entscheidender Bedeutung.

Was die Infrastruktur anbelangt, so werden die Änderungen der Transport-, Lagerungs- und Verteilungsmechanismen für die Aufnahme von Ammoniak-Kraftstoff wahrscheinlich höhere Kosten und Anstrengungen mit sich bringen - Kosten, die sich wahrscheinlich auch auf die Beschäftigung auswirken werden. Diese Kosten dürften sich jedoch in Grenzen halten und in vielen Fällen fix sein, so dass die Grenz- und Stückkosten mittel- und langfristig gering sein dürften.

Executive summary

Carried out in the framework of the CAMPFIRE project “CF11.1 Regulatory Framework and Acceptance of Ammonia”, this study analyses the acceptance-related consequences of introducing green-ammonia as a fuel for vessels in the port of Rostock. The effects are divided into the following categories: employment potential; air quality and health effects; infrastructure; and greenhouse gas emissions. The study measures these effects through the intermediary of three model vessels, as well as in general terms. It also comprises the results of an informal survey carried out among a handful of representatives of the various CAMPFIRE projects.

Where employment effects are concerned, the study finds that the introduction of ammonia powered vessels is likely to lead to some dislocation, which will rise for several years before a new equilibrium is reached. Moreover, introducing ammonia as a shipping fuel is likely to have financial costs which may be reflected in decreased economic activity and therefore employment. The strategic location of Rostock will probably be beneficial in terms of how many jobs are lost and gained, as well as in terms of net average salaries. Even so, employment will remain a sensitive topic and should be a major priority of any strategy designed to raise acceptance of the transition.

Air quality and the health of humans and ecosystems is another sensitive issue. While fossil fuels lead to pollution with very serious repercussions on the health of organisms, and are quite harmful to flora and fauna in case of a leak, these risks are known and familiar, and there are mechanisms in place to minimise and handle them (however imperfect). Being a volatile gas at normal outside temperatures and atmospheric pressure, ammonia is more likely to leak and risks being more toxic to living organisms in the immediate vicinity. In other words, preventing leaks, putting in place ironclad safety mechanisms and ensuring adequate training for people who will handle ammonia will be crucial to the introduction of ammonia as shipping fuel.

In terms of infrastructure, changes to transport, storage and distribution mechanisms to accommodate ammonia fuel are likely to bring increased expense and effort – costs which are likely also to have repercussions on employment. However, these are likely to be quite limited and, in many cases, fixed, meaning that marginal and unit costs should be low in the medium and long term.

Die mit der Verwendung von grünem Ammoniak für die Schifffahrt verbundenen Treibhausgasemissionen könnten Auswirkungen auf die Akzeptanz dieses Kraftstoffs in der Öffentlichkeit haben oder auch nicht. Im Allgemeinen sind die Folgen von Treibhausgasen global und nicht lokal. Außerdem sind an den Netto-Treibhauseffekten von Ammoniak andere Stoffe als Kohlenstoff beteiligt; ihre genauen Mengen und Auswirkungen sind noch unklar und erfordern weitere Forschung.

Insgesamt ist grünes Ammoniak in vielen Situationen eine vielversprechende Alternative zu fossilen Brennstoffen und hat eine große Zukunft in einer kohlenstofffreien Welt. Es gibt jedoch noch eine Reihe von Unwägbarkeiten im Zusammenhang mit seiner breiten Einführung, und es muss noch viel Forschungs- und Sensibilisierungsarbeit geleistet werden, um mittel- und langfristig einen reibungslosen Übergang zu gewährleisten.

Greenhouse gas emissions linked to the use of green ammonia for shipping may or may not have major repercussions on the public acceptance of this fuel. Generally speaking, the effects of greenhouse gases are global not local. Moreover, the net greenhouse effects of ammonia involve substances other than carbon; their exact amounts and effects are still unclear and require more research.

Overall, green ammonia is a highly promising alternative to fossil fuels in many situations, and has a bright future in a post-carbon world. There are still a number of uncertainties linked to its broad adoption, however, and much research and awareness-raising work remains to be done to ensure a smooth transition in the medium and long term.

01

Einleitung

Einleitung

Diese Studie ist ein Ergebnis des Projekts CAMPFIRE 11.1 Ammoniak Rechtsrahmen und Akzeptanz. Die CAMPFIRE-Projekte stehen unter der Schirmherrschaft von WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“, einem Förderprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Ziel ist es, neue Energieumwandlungs- und Speichertechnologien auf der Basis von grünem Ammoniak als mögliche Bausteine eines zukünftigen grünen Energiesystems zu erforschen und zu entwickeln. Ein wichtiger Schwerpunkt des Projekts ist die Wirtschaft in Nordostdeutschland und an der Ostseeküste.¹

Das spezifische Teilprojekt ist CF11.1.3.3 und zielt darauf ab, „den Akzeptanzproblemen mit Informationen und wissenschaftlichen Fakten zu begegnen“, und „den Mehrwert zu ermitteln, den das grüne Kraftstoffprojekt für die Region im Vergleich zum ‚Business-as-usual‘ Szenario schafft“. In der Beschreibung des Teilprojekts heißt es weiter: „Hierbei sollen Faktoren wie Treibhausgasemissionen, Beschäftigungspotenzial, Luftqualität, gesundheitliche Auswirkungen, Infrastrukturverbesserungen und weitere Punkte berücksichtigt werden.“²

Methode und Vorgehen der Studie

Ursprünglich sollte das Teilprojekt eine quantitative Analyse der oben genannten Variablen umfassen. Das CAMPFIRE-Projekt begann im April 2021. Der Zeitplan sah vor, dass die vorliegende Studie bis Ende Oktober 2022 erstellt werden soll. Im Laufe des Projekts wurde deutlich, dass nicht ausreichend eindeutige und quantifizierbare Daten zu diesen Faktoren in ausreichender Zahl erhoben werden konnten. Dies ist unter anderem auf die folgenden Umstände zurückzuführen:

- der experimentelle Charakter von Schiffsantrieben, die Ammoniak als Brennstoff verwenden
- die dynamische Entwicklung der Antriebssysteme, die Gegenstand der CAMPFIRE-Projekte sind, während des Studieneitraums
- der Umstand oder die Befürchtung, dass die von bestimmten Partner:innen vorgeschlagenen technologischen Lösungen potenzielle Geschäftsgeheimnisse sind und sich daher nicht für die Veröffentlichung in einem frei zugänglichen Text eignen würden

Da es unwahrscheinlich erschien, dass eine Studie, die den oben genannten Bedingungen entspricht, bis Oktober 2022 abgeschlossen werden könnte, beschloss das IKEM in enger Abstimmung mit der Projektleitung, den Umfang der Studie auf spezifische Anwendungsfälle im Rostocker Hafen einzuschränken, und zwar mit Ammoniak betriebene Schiffe, die Gegenstand anderer CAMPFIRE-Studien waren. Die Einzelheiten zu diesen Schiffen sind unten im Abschnitt „Parameter der Studie“ aufgeführt.

Einige der thematischen Schwerpunkte dieser Studie werden in den anderen CAMPFIRE-Teilprojekten ausführlicher behandelt. So konzentrieren sich CF10_1, CF10_2, CF10_3 und CF10_4 auf die Infrastruktur, während sich CF10_5 mit der Sicherheit im Falle eines Ammoniakaustritts beschäftigt. Da es thematische Überschneidungen gibt, wird sich in dieser Studie nur auf die akzeptanzbezogenen Aspekte der genannten Themen konzentriert. Damit werden Doppelungen vermieden.

CAMPFIRE-Umfrage

In einer kurzen Umfrage unter den am CAMPFIRE-Projekt beteiligten Partner:innen wurden deren Expert:innenmeinungen zu den Vor- und Nachteilen von Ammoniak als Kraftstoff für Wasserfahrzeuge eingeholt.³ Die Umfrageergebnisse sind in den entsprechenden Abschnitten dieser Studie enthalten.

1 „WIR CAMPFIRE“.

2 Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V., „Leitprojekt TransHyDE, Vorhaben CAMPFIRE 11.1 Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen und Akzeptanzbetrachtungen grüner Ammoniak“.

3 Belltheus Avdic, „Antworten auf Fragenkatalog CAMPFIRE 11.1.3.3 zum Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener praktischer Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen in der Ostsee“.

02

Parameter der Studie

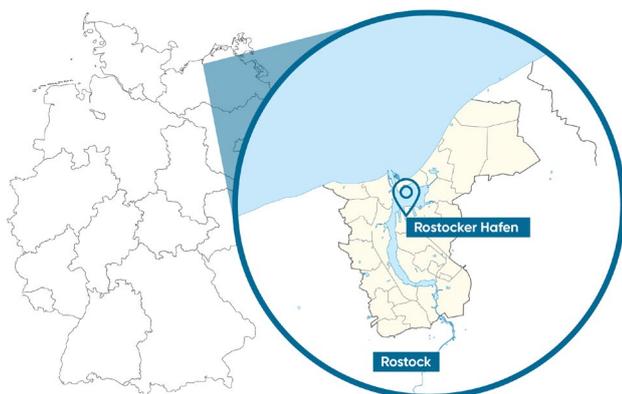
Parameter der Studie

Die Studie wird durch einige Definitionen, Annahmen und Beobachtungen gekennzeichnet, die in diesem Kapitel beschrieben werden.

Region

Die in der Studie gemessenen und verglichenen lokalen Auswirkungen konzentrieren sich auf den Rostocker Hafen, der an der Unterwarnow-Mündung flussabwärts der Stadt Rostock liegt. Er ist der größte deutsche Hafen an der Ostsee und umfasst den Überseehafen und den Fährhafen sowie die kleineren Anlagen im Mündungsgebiet.

Im Jahr 2020 wurden hier 7573 Schiffe empfangen und 25,1 Millionen Tonnen Fracht sowie 1,7 Millionen Fährpassagiere abgefertigt.⁴ Damit ist er nach Hamburg, Bremen und Wilhelmshafen der viertgrößte Hafen in Deutschland. Mit einem besonderen Fokus auf die Akzeptanz, wird die Studie sowohl die Bevölkerung der Stadt Rostock als auch der Region berücksichtigen.



Die Stadt und der Hafen von Rostock

Motortyp

In den CAMPFIRE-Projekten wird eine Reihe von Motoren berücksichtigt. Ammoniak kann Motoren auf drei verschiedene Arten antreiben: direkt als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor, durch eine Brennstoffzelle oder durch eine Brennstoffzelle als Träger für Wasserstoff. Aufgrund seines hohen Zündpunkts erfordert die Verwendung von Ammoniak als Hauptbrennstoff in der Regel einen zusätzlich, sekundären Zündbrennstoff für die Erstzündung. Für einen vollständig umweltfreundlichen Betrieb ist Wasserstoff hier eine gute Option für einen Pilotbrennstoff (und kann sogar direkt aus dem Ammoniakbrennstoff hergestellt werden). Die mittelfristig in der Praxis zum Einsatz im großen Maßstab in Betracht gezogenen Schiffstypen weisen alle eine Kombination dieser Eigenschaften auf.⁵

Das bisher größte im Bau befindliche Schiffsmodell ist die Viking Energy (Stand Oktober 2022 wurde noch keins fertiggestellt). Sie ist ein Versorgungsschiff auf der Nordsee, das umgerüstet wird, um eine Antriebslösung auf der Grundlage von Brennstoffzellen zu testen, die mit reinem und emissionsfreiem Ammoniak betrieben werden. Ziel ist es, bis 2024 Brennstoffzellenmodule mit einer Gesamtleistung von zwei Megawatt auf dem Schiff zu installieren.⁶ Es werden weiterhin auch größere Modelle untersucht, die ammoniakbetriebene Verbrennungsmotoren einsetzen. In der Praxis sind Brennstoffzellen als Technologie noch nicht ausgereift genug, um auf großen Schiffen mehr als nur eine ergänzende Rolle in naher Zukunft zu spielen.⁷

Der Technologiekonzern Wärtsilä hat in enger Zusammenarbeit mit den Kunden Knutsen OAS Shipping AS, Repsol und dem Sustainable Energy Catapult Centre im Jahr 2021 mit dem weltweit ersten Langzeittest von Ammoniak als Kraftstoff in einem maritimen Viertakt-Verbrennungsmotor im großen Maßstab begonnen.⁸ Parallel dazu will MAN Energy Solutions bereits 2024 einen kommerziellen Zweitakt-Ammoniakmotor auf den Markt bringen, gefolgt von einem Nachrüstungspaket für den schrittweisen Umbau bestehender Maritim Schiffe bis 2025.⁹

4 Rostock Port, „Statistiken“.

5 Comes, Wissner, und Sutter, „Ammonia as a marine fuel: Risks and perspectives“.

6 Eidesvik, „Viking Energy with Ammonia-Driven Fuel Cell“.

7 Gallucci, „Why the Shipping Industry Is Betting Big on Ammonia“.

8 Wärtsilä Corporation, „World’s First Full Scale Ammonia Engine Test - an Important Step towards Carbon Free Shipping“.

9 Lindstrand, „The Case for Two-Stroke Ammonia Engines“.



Viking Energy (Quelle: Eidesvik)

Schiffe

Wie bereits im Abschnitt „Methode und Vorgehen der Studie“ erwähnt, konzentriert sich diese Studie auf Schiffe, die Gegenstand der CAMPFIRE-Projekte CF07, CF08 und CF09 sind. Diese Schiffe sind wie folgt beschrieben:

- CF07 Entwicklung des Funktionsmusters einer ammoniakbetriebenen Sport Yacht mit Hybridsystem aus Festoxid-Brennstoffzelle und Motor: „Zielstellung ist die Entwicklung eines Schiffsdesign für eine Sportyacht mit einer 750 W Festoxidbrennstoffzelle-Bordstromversorgung und einem 15 kW Ammoniak-Motorantrieb.“¹⁰
- CF08_1 Entwicklung eines Konzeptes für den emissionsfreien Betrieb eines Binnenschiffes mit dem Kraftstoff Ammoniak: „in Vorbereitung auf die Umrüstung des Schiffes [wird] ein Konzept für ein ammoniakbetriebenes Binnenschiff als Funktionsmuster für eine ausgewählte Fährlinie erstellt, ein 70 kW Ammoniak-Reformer als Schlüsseltechnologie für den motorischen Betrieb der Fähre entwickelt und umgesetzt sowie eine grundlegende Basis für ein Retrofitting von Binnenschiffen daraus abgeleitet.“¹¹
- CF09 Maritime Antriebe: „ein durch Carnival Corporation & PLC neu zu entwickelndes Kreuzfahrtschiff mit einer Antriebsleistung von 40 MW und einem Ammoniak-Tankvolumen von 2.000 Tonnen“.¹²

Die Formulierung von CF08 wurde im Laufe des Sommers 2022 weiter geändert, um sich auf ein bestimmtes Schiff zu konzentrieren, nämlich das Binnenschiff-Gastankerschiff

TMS Odin mit den Abmessungen 47 x 6,61 m und einem 350 kW Liebherr-Verbrennungsmotor. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchung soll ein allgemeines Konzept für die Nachrüstung von Trockenfrachtschiffen des Typs Johann-Welker (80 x 9,5 m) oder des europäischen Typs (85 x 9,5 m) mit einem Ammoniak- und Wasserstoff-betriebenen Verbrennungsmotor mit einer Leistung von 2 x 300 kW erarbeitet werden. Im Projekt werden auch Erweiterungen von Schiffen mit einer Länge von bis zu 110 m in Betracht gezogen.¹³

Die Schiffstypen in CF07 und CF08 sind recht klein. Daher ist es aus technischer Sicht sinnvoll, sich auch auf kleinere Motoren zu konzentrieren, da die Ammoniak-Antriebstechnologie noch in den Kinderschuhen steckt. Gleichzeitig ist es unwahrscheinlich, dass dieser anfängliche Einsatz von Ammoniakantrieben in kleinem Maßstab einen starken messbaren Einfluss auf Variablen hat, die für die öffentliche Akzeptanz relevant sind. Die im Mittelpunkt stehenden akzeptanzrelevanten Faktoren sind Beschäftigungspotenzial, Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen, Infrastrukturverbesserungen sowie Treibhausgasemissionen. In dieser Studie werden daher, wo es sich anbietet, auch größere Schiffe im Allgemeinen sowie spezifisch das dritte Schiff aus CF09 berücksichtigt.

Hierfür gibt es drei Gründe: a) Rostock ist ein großer Hafen, der viele große Schiffe aufnimmt und es ist wichtig, die Auswirkungen der Umstellung solcher Schiffe auf den Betrieb mit Ammoniak zu untersuchen; b) Rostock ist ein wichtiger Fährhafen,

10 CAMPFIRE, „CF07“.

11 CAMPFIRE, „CF08_1“.

12 CAMPFIRE, „CF09“.

13 CAMPFIRE, „Weiterentwicklung der Strategie für Projektlinie CF08 NH3-Binnenschiff (Verbundvorhaben CF08_1 und CF08_2, CF08_3 in Planung)“.

und es ist nützlich, zumindest ein Schiffsmuster zu betrachten, das hauptsächlich für den Transport von Personen und nicht von Gütern ausgelegt ist; und c) langfristig wird Ammoniak (das direkt als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren verwendet wird) vermutlich am ehesten auf großen Schiffen für längere Strecken eingesetzt, während Brennstoffzellen und Batterien eher auf kleineren Schiffen und kürzeren Strecken zum Einsatz kommen könnten.

Das CAMPFIRE Teilprojekt CF09 führt eine technische Bewertung eines neuen Antriebssystems auf Basis einer Wasserstoff-Brennstoffzelle durch, das als Referenz für ein neues Kreuzfahrtschiff der Carnival Corporation & PLC mit einem 40 MW-Antriebssystem dienen soll. Solche Schiffe verkehren im Rostocker Hafen bereits in Form von großen internationalen Fähren und Kreuzfahrtschiffen. Da CF09 außerdem ein Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebssystem berücksichtigt, wird in dieser Studie in einigen Fällen auch Wasserstoff als Ersatz für Ammoniak betrachtet.

Die theoretische Strecke für eine mit Ammoniak betriebene Fähre, die in dieser Studie betrachtet wird, ist die kürzeste, die derzeit von Rostock aus befahren wird, nämlich die Verbindung nach Gedser in Dänemark. Die beiden Fähren, die heute auf dieser Strecke verkehren, haben die folgenden technischen Merkmale:¹⁴

Länge:	169,50 m
Breite:	25,40 m
Maximaler Tiefgang:	6,00 m
Tragfähigkeit:	5.046 t
Reisegeschwindigkeit:	21 Knoten
Maximale Passagieranzahl:	1.300
Maximale Fahrzeuge:	96 LKWs oder 460 PKWs
Motoren:	18 MW

Diese bestehenden Fähren sind außerdem mit einem Flettner-Rotor ausgestattet, der den Magnus-Effekt des Windes nutzen, um bei starkem Seitenwind eine Antriebsleistung von bis zu drei Megawatt zu erreichen. Dieses Segel reduziert die CO₂-Emissionen im Durchschnitt um fünf Prozent, bei gutem Wind sogar um bis zu 20 %.¹⁵

Wie bereits erwähnt, gibt es derzeit keine großen ammoniakbetriebenen Schiffsmotoren, die sich im Bau oder in der Planung befinden. Es gibt jedoch ein Pilotprojekt bei dem untersucht wurde, wie ein großes Schiff zu Ammoniakbetrieb umgerüstet werden kann.¹⁶ Dabei handelt es sich um die M/S Color Fantasy, ein zwischen Kiel und Oslo verkehrendes Kreuzfahrtschiff. Dieses Schiff hat die folgenden Merkmale:¹⁷

Länge:	224 m
Breite:	35 m
Maximaler Tiefgang:	6,8 m
Tragfähigkeit:	5.000 t
Reisegeschwindigkeit:	22 Knoten
Maximale Passagieranzahl:	2.605
Maximale Fahrzeuge:	750 PKWs
Motoren:	39.360 kW

Die M/S Color Fantasy ist wesentlich größer als die zwei Fähren, die heute auf der Strecke Rostock-Gedser verkehren. Es besteht ein erheblicher Unterschied in der Motorleistung, der sich durch die viel längere Strecke der Fährverbindung Kiel-Oslo (623 km im Vergleich zu 50 km) und die besonderen Komfortanforderungen eines Kreuzfahrtschiffs erklären lässt. Die quantitativen Ergebnisse des Pilotprojekts zur Umrüstung der M/S Color Fantasy auf Ammoniaktrieb lassen sich jedoch theoretisch auf eine hypothetische Fähre mit Ammoniaktrieb auf der Strecke Rostock-Gedser übertragen. Die Auswirkungen werden im Folgenden für die Zwecke dieser Studie betrachtet.



M/S Color Fantasy (Quelle: Wikipedia)

¹⁴ Scandlines, „M/F Copenhagen“.

¹⁵ Olling, „Scandlines-færgen tester sparetrick - udstyres med 30 meter højt sejl“.

¹⁶ Grønt Skipsfartsprogram, „Ammoniakk som drivstoff for passasjer skip“.

¹⁷ Color Line, „M/S Color Fantasy“.

03

Beschäftigungspotenzial

Beschäftigungspotenzial

Für den Erfolg einer revolutionären neuen Technologie ist begeisterte Unterstützung und nicht nur resignative Zustimmung erforderlich. Die wahrgenommenen und tatsächlichen Auswirkungen einer solchen Technologie auf die Beschäftigung – ganz zu schweigen von einer Technologie, die einen grundlegenden Wandel in der Produktion, der Verteilung und dem Verbrauch von Energie darstellt – sind entscheidend für ihre breite Akzeptanz in der Bevölkerung.

Entscheidendes sozioökonomisches und politisches Thema

Die notwendige Energiewende bedeutet eine Revolution in vielen Bereichen unserer Gesellschaft, die ebenso tiefgreifend und umfassend sein muss wie beispielsweise die industrielle Revolution, für deren Umsetzung jedoch viel weniger Zeit zur Verfügung steht. Das führt zu unvermeidlichen Umbrüchen. In diesen Tagen der geopolitischen Unruhen, der erschütterten Demokratien und der ermutigten Autokratien ist es wichtiger denn je, große Teile der Bevölkerung für die Eindämmung des Klimawandels zu gewinnen.

Außerdem ist es notwendig dafür zu sorgen, dass die Energiewende möglichst vielen Menschen zugutekommt und ihr Potenzial voll ausschöpft, zu einer gerechteren, wohlhabenderen und gleichberechtigteren Gesellschaft beizutragen. Ein entscheidender Faktor, den es zu bedenken gilt, ist, dass der technologische Fortschritt und der Übergang zu mehr Nachhaltigkeit wahrscheinlich Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt haben werden. Während die Bilanz hier wahrscheinlich positiv ist, d.h. es werden langfristig mehr Arbeitsplätze geschaffen als vernichtet, werden die Personen, deren Arbeitsplätze verschwinden, nicht immer in der Lage sein, die neu geschaffenen Arbeitsplätze zu übernehmen. Neue Berufe werden möglicherweise andere Fertigkeiten und Fähigkeiten erfordern.¹⁸

Es werden langfristig mehr Arbeitsplätze geschaffen als vernichtet

Darüber hinaus dürften sich die Arbeitsplatzzuwächse gleichmäßig auf die gesamte Gesellschaft verteilen, während sich die Verluste wahrscheinlich auf bestimmte geografische Gebiete und sozialen Status konzentrieren. Diese Verschiebungen können möglicherweise zu schwerwiegenden sozialen Umbrüchen auf lokaler Ebene führen. Abgesehen von der geografischen Konzentration, neigen Arbeitsplätze in der fossilen Brennstoffindustrie dazu, eng mit der lokalen Wirtschaft verflochten zu sein. Obwohl der Energiesektor lediglich 1,2 % der weltweiten

Gesamtbeschäftigung ausmacht, kann er einen hohen Prozentsatz des Gesamteinkommens auf lokaler Ebene oder sogar auf nationaler Ebene erreichen. In Saudi-Arabien arbeiten beispielsweise nur 4,8 % der Arbeitskräfte direkt in energiebezogenen Industrien, aber fast 50 % des BIP stammen aus Tätigkeiten im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen.¹⁹

Sie argumentierten, dass Ostdeutschland bei der Energiewende erneut ins Abseits geraten könnte.

Fossile Brennstoffe sind auch in Deutschland ein sensibles Thema. Vor allem in Ostdeutschland hinterließen die 1990er Jahre mit ihren strukturellen Veränderungen und der darauffolgenden Massenarbeitslosigkeit und -abwanderung tiefe Spuren. Im Oktober 2021 warnten die Arbeitgeberpräsident:innen von Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen in einem gemeinsamen Schreiben vor dem Vorhaben der Bundesregierung, den Kohleausstieg auf 2030 vorzulegen statt wie von der vorherigen Regierung vereinbart im Jahr 2038. Sie argumentierten, dass Ostdeutschland bei der Energiewende erneut ins Abseits geraten könnte. Einer von ihnen behauptete sogar, dass ein Viertel der Wertschöpfung in der Region von der mitteldeutschen Braunkohle abhängen würde. Das war das erste Mal, dass die Arbeitgeberverbände aus Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen mit einem gemeinsamen Forderungskatalog an die Öffentlichkeit gingen.²⁰



Der Braunkohle wird häufig eine besondere Bedeutung für die ostdeutsche Wirtschaft zugeschrieben (Quelle: Pixabay)

Diese politische Inszenierung steht im Gegensatz zu den tatsächlichen Einschätzungen von Forscher:innen, dass die Folgen des geplanten Kohleausstiegs zumindest für die direkt Beschäftigten eigentlich recht überschaubar sein dürften. Im Mitteldeutschen Revier ist gut die Hälfte der 3.500 Beschäftigten älter als 50 Jahre, viele werden also vor dem geplanten Ende des Braunkohleabbaus im Jahr 2038 in Rente gehen.

18 Cozzi und Motherway, „The Importance of Focusing on Jobs and Fairness in Clean Energy Transitions“.

19 Cozzi und Motherway.

20 MDR Sachsen-Anhalt, „Arbeitgeber warnen vor früherem Kohleausstieg“.

Gleichzeitig existieren rund 3.600 Arbeitsplätze in Unternehmen, die Aufträge für den Braunkohleproduzenten Mibrag erfüllen und mehrere Unternehmen in der Region, die viel Energie verbrauchen und von billigem Kohlestrom profitieren. Allein in Sachsen-Anhalt

gibt es 15.600 Beschäftigte in diesen Branchen. Ob diese Unternehmen bei steigenden Energiepreisen schließen oder abwandern würden, lässt sich jedoch nicht valide prognostizieren.²¹

Just Transition

Im Idealfall wird eine gerechte und wohlhabende Zukunft dadurch erreicht, dass der Übergangsprozess eine möglichst große Zahl gut bezahlter, hochwertiger Arbeitsplätze schafft, die über alle Gebiete und sozialen Schichten hinweg verteilt sind. Gleichzeitig sollte die Art von Arbeit, die sich tendenziell auf Bevölkerungsgruppen mit geringerem Bildungsniveau in bereits benachteiligten Gebieten konzentriert, möglichst wenig verschwindet. Diese Aspekte sind wichtige Schwerpunkte des sogenannten Just Transition Rahmenplans, der eine Reihe sozialer Maßnahmen umfasst. Der Plan zielt darauf ab, die Rechte und den Lebensunterhalt der Arbeitnehmer:innen im Zuge der Transformation der Wirtschaft hin zu einer nachhaltigen Produktion, der Eindämmung des Klimawandels und dem Schutz der biologischen Vielfalt zu sichern.

Literaturübersicht

Zahlreiche Studien untersuchen die Beschäftigungseffekte der Einführung und Nutzung von Ammoniak und Wasserstoff im Vergleich zu fossilen Brennstoffen. Neue Arbeitsplätze im Zusammenhang mit Wasserstoff und Ammoniak werden wahrscheinlich in den folgenden Bereichen geschaffen:²²

- Offshore-Windenergie für die Erzeugung von Wasserstoff als Kraftstoff
- Elektrolyse-Anlagen
- Ammoniak-Synthesenanlagen
- Mobilität
- Bunkerung
- Forschung & Entwicklung
- Logistik
- Herstellung von Halbfertigprodukten
- Industrielle Hochtemperatur-Heizanwendungen
- Wasserstoff als Rohstoff für die Industrie
- Bauwesen

Die Internationale Energieagentur hat die Auswirkungen eines von ihr definierten Szenarios berechnet, das bis 2050 weltweit zu Netto-Null-Emissionen führen würde. In diesem Szenario würden bis 2030 in der Energieversorgungsbranche weltweit 14 Millionen neue Arbeitsplätze entstehen und fünf Millionen Arbeitsplätze (vor allem in den mit fossilen Brennstoffen verbundenen Branchen) verloren gehen. Gleichzeitig würden bereits bis 2030 weitere 16 Millionen Arbeitsplätze in anderen Industrien geschaffen, vor allem durch Effizienzsteigerungen und die Anwendung sauberer Energie in bestehenden Industrien wie etwa der Automobilindustrie und dem Baugewerbe. Dazu gehören neue Arbeitsplätze, die nur dank der Energierevolution

entstehen können, sowie neue Aufgaben für bestehende Arbeitnehmer:innen, unter anderem im Baugewerbe, der Produktion und bei Wasserstoffanwendungen.²³

Dazu gehören neue Arbeitsplätze, die nur dank der Energierevolution entstehen können, sowie neue Aufgaben für bestehende Arbeitnehmer:innen

Drei Studien kommen zu dem Ergebnis, dass die Herstellung von Wasserstoff und Ammoniak als Kraftstoff sowie anderer Übergangskraftstoffe wie synthetisches Erdgas im späteren Teil der Energiewende (unter der Annahme, dass das Jahr 2050 als Ziel für die Dekarbonisierung gilt) zu einem erheblichen Anstieg der Beschäftigung führen wird, wobei im Jahr 2050 weltweit etwa 3,6 Millionen direkte Arbeitsplätze entstehen werden. Der Großteil dieser Arbeitsplätze wird voraussichtlich mit Wasserelektrolyseuren verbunden sein, hauptsächlich für die Herstellung von Wasserstoff. Mit einem abrupten Anstieg der Zahl der Arbeitsplätze ist spätestens um 2040 zu rechnen, in Abhängigkeit davon wie schnell die Industrie ihre Produktion hochfährt.²⁴

Studien des Beratungsunternehmens Navigant gehen davon aus, dass die Produktion von 1.710 TWh Wasserstoff durch Elektrolyse (die Menge, die in einem Szenario mit hohem Verbrauch als optimal errechnet wurde) 300.000 bis 450.000 hochquali-

21 Kropp u. a., „Kurzstudie zur Beschäftigungsstruktur im Mitteldeutschen Revier“.

22 Leguijt u. a., „Werk door investeringen in groene waterstof: Update en uitbreiding“.

23 Cozzi und Motherway, „The Importance of Focusing on Jobs and Fairness in Clean Energy Transitions“.

24 Ram u. a., „Job Creation during a Climate Compliant Global Energy Transition across the Power, Heat, Transport, and Desalination Sectors by 2050“; Bogdanov u. a., „Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability“; Ram u. a., Global Energy System Based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors.

fizierte direkte Arbeitsplätze und weitere 650.000 bis 900.000 indirekte Arbeitsplätze in Europa schaffen könnte. Das entspricht einem Beschäftigungsfaktor von etwa 575 bis 775 Arbeitsplätzen/TWh für Wasserstoff. Aufgrund der großen Kapitalinvestitionen, die für die Wasserstoffproduktion erforderlich sind – sowohl im Zusammenhang mit den Elektrolyseuren als auch mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien – wird erwartet, dass die Arbeitsplätze in der Wasserstoffindustrie eher vorübergehender Natur sein werden und sich auf die Konstruktions- und Bauphase konzentrieren.²⁵

Das entspricht einem Beschäftigungsfaktor von etwa 575 bis 775 Arbeitsplätzen /TWh für Wasserstoff.

Ein Bericht des niederländischen Forschungsinstituts CE Delft geht davon aus, dass sich die durch eine grüne Wasserstoffrevolution geschaffenen Arbeitsplätze weitgehend gleichmäßig über die ganze Niederlande verteilen würden, wobei besonders die Hafenregionen einen kleinen Vorteil hätten. Die Studie kommt ferner zu dem Schluss, dass die meisten Arbeitsplätze im Upstream und Midstream-Bereich für einmalige und laufende Arbeiten neu geschaffen würden, während lediglich Arbeitsplätze im Downstream-Bereich (vor allem im Mobilitätssektor) weitgehend bestehende Arbeitsplätze ersetzen würden.²⁶ Bis 2050 werden viele Arbeitsplätze (vor allem in der fossilen Industrie) wahrscheinlich ganz verschwinden und neue Ersatzarbeitsplätze entstehen. Die genauen Zahlen sind jedoch ungewiss und das Ausmaß der Veränderungen (und damit das Risiko von Umbrüchen) würde erheblich zunehmen, wenn die Wasserstoffrevolution nach 2030 endgültig einsetzt.²⁷

Bis 2050 werden viele Arbeitsplätze (vor allem in der fossilen Industrie) wahrscheinlich ganz verschwinden und neue Ersatzarbeitsplätze entstehen.

Laut einer Studie des Beratungsunternehmens Trinomics könnte die europäische Wasserstoffwirtschaft bis 2030 das Äquivalent von 104.060 bis 357.630 Vollzeitarbeitsplätzen schaffen. Je nach Szenario wären 29.270 bis 106.980 davon direkte Arbeitsplätze in Produktion, Betrieb und Wartung, während etwa 74.790 bis 250.650 indirekt geschaffen würden.²⁸

Für Deutschland hat eine Studie des Wuppertal Instituts und von DIW Econ im Auftrag des Landesverbands Erneuerbare Energien NRW e. V. (LEE-NRW) ergeben, dass bei einem optimistischen Szenario eines inländischen Wasserstoffproduktionsanteils von 90 Prozent im Jahr 2050 402.000 bis 905.000 zusätzliche Arbeitsplätze, die direkt und indirekt mit der grünen Wasserstoffproduktion zusammenhängen, möglich sind (bis zu 30 Milliarden Euro Wertschöpfung). Allerdings geht die Studie davon aus, dass ein großer Teil des Wasserstoffs aus dem Ausland importiert werden muss, so dass diese Zahlen einen Höchstwert darstellen.²⁹

Eine Studie des Beratungsunternehmens H2FC SUPERGEN schätzt, dass die fossile Brennstoffwirtschaft im Vereinigten Königreich 0,38 direkte und 2,55 indirekte Vollzeitäquivalente pro einer Million Pfund Endverbrauchsausgaben für Benzin oder Diesel beschäftigt. Mit anderen Worten: Ein Rückgang der Ausgaben um eine Million Pfund würde zu einem Verlust von 2,93 Vollzeitäquivalenten in den entsprechenden Lieferketten führen. Diese Verluste würden sich direkt auf den Sektor der raffinierten Brennstoffe sowie indirekt auf den Groß-/Einzelhandel, die gewerbliche/technische Industrie, die Verwaltung/Unterstützung und andere öffentliche/private Dienstleistungsbranchen auswirken. Der Sektor „raffinierte Brennstoffe“ hat den niedrigsten Produktions-Beschäftigungs-Multiplikator aller 103 Sektoren des Landes. Er hat auch den niedrigsten Produktions-Lohn-Multiplikator, wenn auch in geringerem Ausmaß, was bedeutet, dass die finanziellen Auswirkungen erheblicher sein könnten.³⁰ Wenn die Ausgaben für den Sektor der raffinierten Brennstoffe auf einen anderen Sektor innerhalb des Landes verlagert werden, dürfte sich dies positiv auf die Beschäftigung und die Einkommen insgesamt auswirken, so die Schlussfolgerung. In der Studie wurden die Gas- und Elektrizitätssektoren als Stellvertreter für einen hypothetischen Wasserstoffsektor verwendet, der raffinierte Brennstoffe ersetzen könnte, da der Gassektor eine ähnliche Infrastruktur nutzt und der Elektrizitätssektor ähnliche sekundäre Energieversorgungsmerkmale aufweist.³¹

25 Navigant, „Gas for Climate: Job Creation by Scaling up Renewable Gas in Europe“.

26 Die Begriffe Upstream, Midstream und Downstream bezeichnen im Sektor der fossilen Brennstoffe die Gewinnung, den Transport sowie die Aufbereitung, Vermarktung und Zustellung.

27 Leguijt u. a., „Werk door investeringen in groene waterstof: Update en uitbreiding“.

28 Gérard u. a., „Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans: Final Report“.

29 Merten u. a., „Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung“.

30 Smith u. a., The Economic Impact of Hydrogen and Fuel Cells in the UK – a Preliminary Assessment Based on Analysis of the Replacement of Refined Transport Fuels and Vehicles.

31 Smith u. a.

Ammoniakproduktion, -speicherung und -verwendung sind diesen beiden Sektoren mindestens ebenso ähnlich wie Wasserstoff, da Ammoniak im Allgemeinen einfacher zu handhaben ist als Wasserstoff und ohne größere Infrastrukturumstellungen in mehr Anwendungen eingesetzt werden kann.

Der Gassektor beschäftigt 2,02 direkte und 6,02 indirekte oder induzierte Vollzeitäquivalente pro Million Pfund an Endausgaben. Die Zusammensetzung der indirekten und generierten Arbeitsplätze ist ähnlich wie bei den raffinierten Brennstoffen (vor allem in den Bereichen Groß-/Einzelhandel, Freiberufler/Techniker, Verwaltung/Unterstützung und anderen öffentlichen/privaten Dienstleistungsbranchen), was bedeutet, dass der Verlust an indirekten und generierten Arbeitsplätzen infolge einer Verringerung des Verbrauchs von raffinierten Brennstoffen durch den Übergang zu wasserstoffbasierten Brennstoffen leicht kompensiert werden könnte (im Übrigen liegt die Zahl von 6,02 für Gas deutlich über den 2,55 für raffinierte Brennstoffe). Auch ein großer Teil der direkten Beschäftigung könnte durch einen hypothetischen Übergang zu Wasserstoff absorbiert werden, zumal der Multiplikator zwischen Output und direkter Beschäftigung so viel höher ist (0,38 gegenüber 2,02 Vollzeitäquivalenten pro Million Pfund Endausgaben). Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Elektrizitätssektor, in dem 0,94 Vollzeitäquivalente direkt und 7,11 Vollzeitäquivalente indirekt je eine Million Pfund Endausgaben beschäftigt sind. Außerdem dürften die Gehaltsprofile in allen drei Sektoren ähnlich sein, was bedeutet, dass eine Umstellung von raffinierten Brennstoffen auf einen Wasserstoff-Proxy, der sich aus den Profilen der Gas-/Stromsektoren zusammensetzt, nicht zu wesentlich schlechteren Arbeitsplätzen führen würde. Die Ausgaben im Elektrizitätssektor führen zu mehr indirekter und induzierter Beschäftigung im verarbeitenden Gewerbe als im Gas- oder Raffineriesektor, was im Allgemeinen als positives Merkmal angesehen werden kann.

Konkret kommt die Studie zu dem Fazit, dass die Umverteilung von Endausgaben in Höhe von einer Million Pfund von raffinierten Brennstoffen auf Gas oder Strom (als Ersatz für Wasserstoff) zur Schaffung von 5,11/5,12 Vollzeit-Arbeitsplätzen in der gesamten britischen Wirtschaft führen würde (unter der Annahme eines Wechselkurses von 1,19 Euro pro Pfund Sterling am 31. Dezember 2021 entspricht dies 4,29/4,30 Vollzeit-Arbeitsplätzen pro Million Euro) und zu einem potenziellen Nettoanstieg des Lohneinkommens von etwa 0,132 Mio. Pfund. Die einzige Berufsgruppe, in der es zu substanziellen Arbeitsplatz- und Lohnverlusten kommen würde, wäre die „Herstellung von Mineralölerzeugnissen“.³²

Auswirkungen auf den Rostocker Hafen

Auch wenn das Bild, das sich aus den verschiedenen Studien ergibt, komplex und vielfältig ist, scheinen sich bestimmte Trends einer Energie- und Mobilitätswende weg von fossilen Brennstoffen festzustehen. Erstens wird der Übergang zu einem kurzfristigen Verlust vieler Arbeitsplätze führen, die schnell durch neue Arbeitsplätze ersetzt werden. Diese können teilweise eine umfangreiche Umschulung erfordern. Mit anderen Worten: Während die Nettoveränderung der Beschäftigung insgesamt mit ziemlicher Sicherheit positiv zu bewerten ist, wird sich die Art der Arbeit ändern, was kurz- und mittelfristig zu Verlagerungen führen wird. Der Höhepunkt dieser Verlagerung wird wahrscheinlich Anfang der 2030er Jahre erreicht. Die Häfen werden wahrscheinlich stärker von Umstrukturierungen betroffen sein als das Hinterland. Besonders die Häfen wie in Rostock, die sowohl Verkehrsknotenpunkte für Güter und Personen als auch wahrscheinliche Zentren für die Offshore-Windenergieerzeugung und die Wasserstoff-/Ammoniakproduktion sind, werden ein attraktives Arbeitsumfeld mit guten Arbeitsplätzen bieten.

Die Art der Arbeit wird sich ändern, was kurz und mittelfristig zu Verlagerungen führen wird.



*Der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft würde einige Arbeitsplätze verschwinden lassen, aber viele neue schaffen
(Quelle: Siemens Energy)*

Die Übertragbarkeit der Studienergebnisse auf die hypothetische Fähre, das kleine Frachtschiff und die Segelyacht in Rostock ist beschränkt. Es scheint sicher zu sein, dass die Umstellung auf den Betrieb mit Ammoniak insgesamt zu einem Nettogewinn an Arbeitsplätzen führen würde. So investiert beispielsweise die ROSTOCK PORT GmbH, Eigentümer und Betreiber des Rostocker Hafens, zwischen 2022 und 2026 rund 220 Millionen Euro in den Ausbau ihrer Anlagen.³³ Auch Scandlines, die derzeit sieben Fähren auf der Ostsee betreiben, einschließlich zweier Fähren auf der Linie Rostock-Gedser, investierten 2021 rund 22 Millionen Euro.³⁴

Es scheint sicher zu sein, dass die Umstellung auf den Betrieb mit Ammoniak insgesamt zu einem Nettogewinn an Arbeitsplätzen führen würde.

Dies vermittelt eine Vorstellung von der Größenordnung der für die Schifffahrt ausgegebenen Summen. Laut der oben zitierten H2FC-SUPERGEN-Studie würden Investitionen in Höhe von 20 Mio. Euro, die in Wasserstoff/Ammoniak statt in fossile Brennstoffe getätigt werden, zu einem Nettogewinn von 86 Arbeitsplätzen und 2,64 Mio. Euro mehr Lohnneinkommen führen. Natürlich würden viele dieser Gewinne in Anlagen für erneuerbare Energien, Elektronunternehmen, Ingenieurbüros und Produktionszentren weit entfernt von Häfen wie Rostock entstehen. Wenn die niederländische Studie von CE Delft herangezogen wird, kann davon ausgegangen werden, dass auch die deutschen Häfen wahrscheinlich überproportional profitieren werden. Rostock würde als ein wichtiges Zentrum für Offshore-Windenergie sein, das wahrscheinlich den zukünftigen Wasserstoff/Ammoniak-Boom antreiben wird. Die Schifffahrt wird wahrscheinlich einen Großteil des erneuerbar erzeugten Kraftstoffs verbrauchen, wovon Rostock mit Sicherheit profitieren wird.

Investitionen in Höhe von 20 Mio. Euro könnten zu einem Nettogewinn von 86 Arbeitsplätzen und 2,64 Mio. Euro mehr Lohnneinkommen führen.

Um den größtmöglichen Nutzen zu erzielen, ist es wichtig, Treibstoffengpässe im Zusammenhang mit dem Übergang zu vermeiden. Da Ammoniak noch nicht in großem Umfang als

Brennstoff verwendet wird, müssen zuverlässige neue Sicherheitsverfahren entwickelt und eingeführt werden. Zusätzlich bedarf es ausreichend geschultes Personal. Neue Elektrolyseanlagen erfordern neue Fertigungs- und Servicefähigkeiten, die zum Teil von den Herstellern und Betreibern selbst bereitgestellt werden können, zum Teil aber auch durch umfangreiche Umschulungen erworben werden müssen.

Eine Studie untersuchte die Kosten für die Umstellung auf Ammoniakbetrieb für eine Fähre, die Kiel und Oslo verbindet und ähnlich groß ist wie die derzeit auf der Strecke Rostock-Gedser verkehrenden Fähren. Die Umstellung würde zu zusätzlichen, nicht zu vernachlässigenden Umrüstungs- und Betriebskosten führen.³⁵ Diese Mehrkosten dürften zum Teil durch staatliche oder EU-Subventionen, zum Teil durch höhere Verbraucher:innenpreise (Reduzierung der Nachfrage) und zum Teil durch niedrigere Betriebsfrequenzen (Reduzierung des Angebots) ausgeglichen werden. All diese Auswirkungen könnten zu einem relativen Rückgang der Beschäftigung auf den Schiffen und in den Häfen führen. Der Nettoeffekt dürfte hingegen gering sein.

CAMPFIRE-Umfrage

Nach Angaben der CAMPFIRE-Partner:innen bestehen eine Reihe von Unterschieden in der Nutzung von Ammoniak und fossilen Brennstoffen als Brennstoff in Häfen, was zu potenziellen Unterschieden bei der Anzahl und Art der verfügbaren Arbeitsplätze führt. Bei der Wartung von Schiffen, die mit Ammoniak betrieben werden, ist im Vergleich zu fossilen Brennstoffen mit einem höheren Zeit- und Arbeitsaufwand zu rechnen, um gasfreie Betriebsbedingungen gewährleisten zu können. Bei der Treibstoffversorgung (sowohl bei der Aufbereitung des Treibstoffs als auch beim Füllen der Schiffe) ist Gasöl der einfachste Treibstoff, während Flüssigerdgas (LNG) wesentlich komplexer und Ammoniak noch komplizierter ist. Ammoniak erfordert einen erhöhten Aufwand und zusätzliche Anforderungen an Ausbildung, Schutzausrüstung und Sicherheitstechnik. In Anbetracht der geringeren Energiedichte von Ammoniak wird die Betankung wahrscheinlich auch mehr Zeit in Anspruch nehmen und/oder spezielle Infrastrukturen wie Kräne erfordern, um die Verwendung von vorab befüllten Behältern zu ermöglichen.³⁶ Diese Auswirkungen werden wahrscheinlich den Bedarf an qualifizierten und gut bezahlten Arbeitskräften im Hafen erhöhen.

33 Hanse- und Universitätsstadt Rostock, „Haushaltsplan 2022/2023“.

34 Scandlines Infrastructure ApS, „Annual report and sustainability report“.

35 Wisløff und Nervold, „Report for pilot “Ammonia as Fuel”“.

36 Belltheus Avdic, „Antworten auf Fragenkatalog CAMPFIRE 11.1.3.3 zum Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener praktischer Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen in der Ostsee“.



Den Bedarf an qualifizierten und gut bezahlten Arbeitskräften im Hafen wird wahrscheinlich erhöht (Quelle: Pixabay)

Empfehlungen

Mit einer Übergangsstrategie (die idealerweise gemeinsam mit dem Land und/oder dem Bund beschlossen wird), die ein sorgfältig konzipiertes Umschulungsprogramm einschließt, kann die Mehrzahl der vorhandenen Beschäftigten weiterbeschäftigt und zusätzliche Arbeitskräfte eingestellt werden. Es ist von entscheidender Bedeutung, Studiengänge im Ingenieurbereich, den Handwerkskammern und den Fachhochschulen in die Vorbereitung von Abschlüssen und Ausbildungsgängen einzubeziehen, die die künftigen Arbeitskräfte für den Einsatz von Ammoniakmobilität in Häfen ausbilden.

Die Ausbildung sollte parallel zu einer engen Beobachtung von und Zusammenarbeit mit Sektoren und Industrien geschehen, die mit der Produktion, Lagerung und Verarbeitung von Ammoniak verflochten sind und in Zukunft für den Ros-

tocker Hafen von Bedeutung werden könnten. Dazu gehören die Offshore-Windenergie (insbesondere für die Wasserstoff- und Ammoniakherzeugung), die Logistik, die Herstellung von Maschinenkomponenten, alle Arten von maritimen Bau- und Dienstleistungstätigkeiten sowie der Maschinenbau.

Es ist von entscheidender Bedeutung, Studiengänge einzubeziehen, die die künftigen Arbeitskräfte in Häfen ausbilden.

04

Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen

Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen

In diesem Abschnitt werden die allgemeinen Auswirkungen von fossilen Brennstoffen und Ammoniak auf die Luftqualität und die Gesundheit von Menschen, Flora und Fauna beschrieben und eine Reihe von Szenarien zum Vergleich herangezogen.

Auswirkungen fossiler Brennstoffe auf die Luftqualität und die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen

Einer Studie zufolge ist jeder fünfte Todesfall weltweit auf die durch fossile Brennstoffe verursachte Luftverschmutzung zurückzuführen.³⁷ Der Schiffsverkehr, der für einen erheblichen Teil des Verbrauchs fossiler Brennstoffe verantwortlich ist, befördert drei Viertel des weltweiten Frachtaufkommens,³⁸ sowie ein sehr hohes Passagieraufkommen auf Fähren und Kreuzfahrtschiffen.³⁹ Schiffsantriebe emittieren eine Vielzahl von Schadstoffen, die erhebliche Auswirkungen auf die Gesundheit entfalten. Feinstaub (PM_{2,5}), Schwefeloxide (SO_x) und Stickoxide (NO_x), die von Schiffsantrieben erzeugt werden, führen zu vorzeitiger menschlicher Sterblichkeit und Morbidität, die gut dokumentiert sind. Insbesondere SO_x-Emissionen bilden Sulfataerosole (SO₄), die die menschliche Gesundheit gefährden und zur Versauerung der terrestrischen und aquatischen Umwelt beitragen.⁴⁰ Das liegt vor allem daran, dass Schiffe im Gegensatz zu Personen- und Lastkraftwagen in der Regel keine Abgastechnik verwenden, so dass große Mengen an gesundheitsgefährdenden Luftschadstoffen wie Feinstaub, Dieselruß oder Stickoxide ungefiltert in die Luft abgegeben werden. Außerdem verwenden Schiffe in der Regel den schwersten, billigsten und umweltschädlichsten fossilen Brennstoff, nämlich ungefiltertes und ungereinigtes Schweröl.

Es wird erwartet, dass sich die weltweiten Emissionen aus der Schifffahrt zwischen 2020 und 2050 mehr als verdreifachen werden, wobei ein Großteil dieser Verschmutzung nicht reguliert ist. Einer Metastudie zufolge konzentrieren sich die derzeitigen Maßnahmen vor allem auf relative Verbesserungen als auf absolute Schadstoffwerte, so dass die Zielerreichung der Schadstoffreduzierung unwahrscheinlich ist. Ausschlaggebend dafür ist vor allem die Überkompensation der Steigerungen der Kraftstoffeffizienz und der Sauberkeit durch eine regelmäßige Erhöhung der Transportfrequenz. Darüber hinaus sind viele Maßnahmen freiwillig oder anreizbasiert; regulatorische Ansätze sind weitgehend auf Emissionskontrollgebiete beschränkt. Es scheint nur wenige bis gar keine politischen Maßnahmen zu geben, die den Übergang zu kohlenstofffreien Kraftstoffen

fördern oder erzwingen. Der relative Beitrag der Schifffahrt zu den globalen Gesamtluftschadstoffen und -emissionen ist zwar derzeit noch gering, wird aber relativ und absolut gesehen zunehmen. Darüber hinaus ist die Schifffahrt häufig ein Hauptfaktor für die räumlich begrenzte Luftverschmutzung, die insbesondere Hafen- und Küstengemeinden betrifft.⁴¹



Schiffe verwenden in der Regel keine Abgastechnik, so dass große Mengen an gesundheitsgefährdenden Luftschadstoffen ungefiltert in die Luft abgegeben werden. (Quelle: Pixabay)

Es wird erwartet, dass sich die weltweiten Emissionen aus der Schifffahrt zwischen 2020 und 2050 mehr als verdreifachen werden

Einer weiteren Studie zufolge verursacht der Schiffsverkehr bis zu 60 % des NO₂ und 40 % des PM_{2,5} im Hamburger Hafen und in den nahe gelegenen Industriegebieten. In den Wohngebieten nördlich des Hafens trug der Schiffsverkehr bis zu 20 bis 30 % der NO₂- und PM_{2,5}-Werte bei. Das Gesamtergebnis war, dass 14 % der Hamburger Bevölkerung einer stündlichen NO₂-Konzentration über dem stündlichen WHO-Grenzwert von 200 µg/m³ und weniger als 1 % einer jährlichen NO₂-Konzentration über dem Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ ausgesetzt waren. Weitere 39 % der Hamburger:innen waren einer PM_{2,5}-Konzentration über dem WHO-Jahresgrenzwert von 10 µg/m³ ausgesetzt.⁴²

In einer anderen Studie wurde festgestellt, dass die langfristige Exposition gegenüber Feinstaub, der von Schiffen in lediglich acht Städten im Mittelmeerraum emittiert wird, um das Jahr 2020 herum für etwa 430 (220-650 in einem 95 %-Konfidenz-

37 Vohra u. a., „Global Mortality from Outdoor Fine Particle Pollution Generated by Fossil Fuel Combustion“.

38 International Transport Forum, ITF Transport Outlook 2021.

39 Cruise Market Watch, „Growth“.

40 Sofiev u. a., „Cleaner Fuels for Ships Provide Public Health Benefits with Climate Tradeoffs“.

41 Gössling, Meyer-Habighorst, und Humpe, „A Global Review of Marine Air Pollution Policies, Their Scope and Effectiveness“.

42 Ramacher u. a., „Contributions of Traffic and Shipping Emissions to City-Scale NO_x and PM_{2.5} Exposure in Hamburg“.

intervall) vorzeitige Todesfälle pro Jahr verantwortlich ist. Eine Analyse der früheren und aktuellen Verschmutzung durch die Schifffahrt in der Nord- und Ostsee gibt an, dass in Gebieten nahe der großen Schifffahrtsrouten mit Emissionswerten vor den für die Schwefelemissionskontrollgebiete der Nord- und Ostsee im Jahr 2010 festgelegten Reduzierungen etwa 0,1 bis 0,2 Lebensjahre pro Person verloren gingen. Die neuen Emissionsvorschriften führten zu einem generellen Rückgang der relevanten Partikelkonzentration – aber eine Zunahme der Schiffsaktivitäten führte stattdessen zu höheren Emissionen anderer Komponenten, insbesondere von NO_x , vor allem in und um mehrere große Häfen.⁴³

Ein besonderes Problem ist der sogenannte Ultrafeinstaub, der von Verbrennungsmotoren ausgestoßen wird. Während Feinstaub mit einem Durchmesser von 10 (PM10) und 2,5 (PM2,5) Mikrometern gut dokumentiert und einfach zu messen und zu regulieren ist, sind ultrafeine Partikel dafür zu klein (im Allgemeinen mit einem Durchmesser zwischen 0,001 und 0,1 Mikrometern definiert). Daher fehlen rechtliche Grenzwerte und geeignete Messstudien – zwei Situationen, die sich wechselseitig verstärken.⁴⁴ Ultrafeine Partikel verursachen noch stärkere pulmonale Entzündungen und verbleiben länger in der Lunge als feine Partikel (PM2,5). Sie verursachen systemische Entzündungen, endotheliale Funktionsstörungen und Veränderungen der Blutgerinnung, die Menschen für ischämische Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Hypertonie prädisponieren. Sie werden auch mit Diabetes und Krebserkrankungen in Verbindung gebracht. Sie können über die Geruchsnerve bis zum Gehirn vordringen und zerebrale und autonome Funktionsstörungen verursachen.^{45, 46}

Ein besonderes Problem ist der sogenannte Ultrafeinstaub

Während rund 1000 ultrafeine Partikel pro Kubikzentimeter (pt/cm^3) Luft als unbedenklich gelten, wurden laut einer Studie des Naturschutzbundes Deutschland an den Terminals in den Häfen von Hamburg, Kiel oder Warnemünde bei Rostock stellenweise über 400.000 pt/cm^3 gefunden. Dies entspricht einer Belastung, die selbst die Luftverschmutzung an stark befahrenen Straßen und Hauptverkehrswegen um das Fünfzig- bis Achtzigfache übersteigt.⁴⁷

Auswirkungen von Ammoniak auf die Luftqualität und die Gesundheit von Menschen und Ökosystemen

Die Folgen eines groß angelegten Einsatzes von Ammoniak als Schiffskraftstoff lassen sich nur schwer messen oder vorher-sagen, da Ammoniak in der Praxis derzeit nicht als Kraftstoff verwendet wird, obwohl es in anderen Anwendungsbereichen seit langem in der Praxis bewährt eingesetzt wird. Es ist jedoch klar, dass sich Ammoniak in der Luft ausbreitet und sich in Ökosystemen ablagern kann, wo es zu unerwünschten und unkontrollierbaren Eutrophierungseffekten führen kann. Darüber hinaus trägt die atmosphärische Ammoniakdeposition auch zur Versauerung des Bodens bei. Ammoniak kann Ökosysteme und Pflanzen auch direkt schädigen, da es auf die Blattoberfläche eine toxische Wirkung hat. Außerdem wird es nach der Freisetzung nicht sofort vom Wind fortgetragen, da es zunächst sehr kalt bleibt und zu Boden sinkt.⁴⁸ Wenn es ins Wasser gelangt, kann seine Wirkung auf Meereslebewesen genauso tödlich sein wie die von Schweröl oder noch gravierender. Während Öl auf dem Wasser schwimmt und bei Reinigungsarbeiten aufgesaugt werden kann, löst sich Ammoniak im Wasser auf. Zugleich verdunstet es schneller als Öl.⁴⁹

43 Jonson u. a., „Model Calculations of the Effects of Present and Future Emissions of Air Pollutants from Shipping in the Baltic Sea and the North Sea“ and this decrease is expected to continue. Within the same time span emissions from shipping have increased in EU ports and in the Baltic Sea and the North Sea, defined as SECAs (sulfur emission control areas)

44 Umweltbundesamt, „Fragen und Antworten“.

45 Schraufnagel, „The Health Effects of Ultrafine Particles“.

46 Kwon, Ryu, und Carlsten, „Ultrafine Particles“.

47 Naturschutzbund Deutschland, „Luftverschmutzung durch Kreuzfahrtschiffe“; Ostsee-Zeitung, „TV-Doku zeigt: So verschmutzen Kreuzfahrtschiffe die Luft in Rostock-Warnemünde“.

48 Umweltbundesamt, „Ammoniak“.

49 Handelsblatt, „Möglicher Ersatzstoff für Gas: Ammoniak für Schiffsmotoren – hilft das dem Klimaschutz?“

Die toxische Wirkung von Ammoniak ist vor allem darauf zurückzuführen, dass es danach strebt, sich mit Wasser zu verbinden, und schnell mit der Feuchtigkeit in lebendem Gewebe reagiert und ätzend wirkt. Dies kann zu Reizungen und schließlich zu Verätzungen der Schleimhäute in Organen wie Augen und Lunge sowie der Haut führen, die verbrannt werden kann. Bei Kontakt mit verflüssigtem Ammoniak sind Erfrierungen zu befürchten.⁵⁰

Die folgende Tabelle zeigt die Toxizitätswerte von Ammoniak in Bezug auf die Konzentration in der Luft.⁵¹ Die akuten Expositionsrichtwerte (AEGL für *Acute Exposure Guideline Levels*) sind toxikologisch begründete maximale Massenkonzentrationen für verschiedene Expositionszeiträume, die unter anderem im Bundes-Immissionsschutzgesetz verwendet werden. Die Definitionen lauten wie folgt:

- AEGL-1 spürbares Unwohlsein
- AEGL-2 schwerwiegende, lang andauernde oder fluchtbehindernde Wirkung
- AEGL-3 tödliche Wirkung

Wert	10 Minuten	30 Minuten	1 Stunde	4 Stunden	8 Stunden
AEGL-1	30 ppm	30 ppm	30 ppm	30 ppm	30 ppm
AEGL-2	220 ppm	220 ppm	160 ppm	110 ppm	110 ppm
AEGL-3	2.700 ppm	1.600 ppm	1.100 ppm	550 ppm	390 ppm

Tabelle 1: AEGL-Werte für Ammoniak (Quelle: Umweltbundesamt, „AEGL – Störfallbeurteilungswerte“).

Ammoniak hat einen sehr stechenden Geruch, der von Menschen bei Konzentrationen von weniger als 5 ppm wahrgenommen werden kann. Bei 50 ppm ist er sehr penetrant. Freiwillige Versuchspersonen, die Ammoniak ausgesetzt waren, zeigten eine leichte Reizung der Augen, der Nase, des Rachens und der Brust bei 30 ppm (innerhalb von 10 Minuten); eine mäßige Reizung bei 50 ppm (10 Minuten bis 2 Stunden); eine mäßige bis starke Reizung bei 80 ppm (30 Minuten bis 2 Stunden); sehr starke Reizung bei 110 ppm (30 Minuten bis 2 Stunden) und unerträgliche Reizung bei 140 ppm (30 Minuten bis 2 Stunden).

⁵² Das bedeutet, dass Menschen in allen, außer in Extremsituationen, in der Lage sein sollten, schwere Schäden durch verschüttete Stoffe zu erkennen und zu vermeiden, ohne dass eine spezielle Ausrüstung benötigt wird.

Ammoniak hat einen sehr stechenden Geruch, der von Menschen bei Konzentrationen von weniger als 5 ppm wahrgenommen werden kann.

Wenn Ammoniak als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor verwendet wird, kann es durch die Bildung von Stickoxiden (NO_x) indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Die Bildung von Stickoxiden wird im Allgemeinen durch zwei Mechanismen der Ammoniakverbrennung bestimmt: durch die Fixierung von molekularem Stickstoff, der in der Verbrennungsluft enthalten ist (thermische NO_x), oder die Oxidation von organischem Stickstoff, der chemisch im Kraftstoff gebunden ist (Kraftstoff- NO_x).⁵³

Stickoxide haben direkte Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt: Sie können die Atemwege schädigen und chronische Lungenkrankheiten verursachen⁵⁴ sowie sauren Regen in der Atmosphäre verursachen.⁵⁵ Außerdem können Stickoxide mit flüchtigen organischen Verbindungen in den unteren Teilen der Atmosphäre mit einfallenden Sonnenstrahlen reagieren und Ozon bilden, das in diesen relativ niedrigen Höhen der Troposphäre stark zur Smogbildung beiträgt.⁵⁶ Das vom Menschen verursachte troposphärische Ozon wird für verschiedene weitreichende gesundheitliche Auswirkungen, wie Atemwegsprobleme und Lungenkrankheiten verantwortlich gemacht, die weltweit zu etwa einer Million Todesfällen pro Jahr führen.⁵⁷ Eine erhöhte Ozonkonzentration in der Troposphäre schadet auch der Umwelt, da sie das Wachstum von Pflanzenarten verhindert und während ihrer relativ kurzen Lebensdauer in der Atmosphäre (bis zu einigen Wochen) als Treibhausgas wirkt.⁵⁸

Weiter oben in der Atmosphäre können Stickoxide stattdessen zu einem Ozonabbau führen, der den Schutz der Erde vor ultravioletter Strahlung (UV) verringert. Dies führt zu einem er-

- 50 US Department of Homeland Security, Home Science and Technology Directorate, „Securing Transportation of Ammonia—Agricultural Lifeline and Future Affordable, Clean Energy Source“.
- 51 National Research Council (US) Committee on Acute Exposure Guideline Levels, „Ammonia Acute Exposure Guideline Levels“.
- 52 National Research Council (US) Committee on Acute Exposure Guideline Levels.
- 53 Alnasif u. a., „Experimental and Numerical Analyses of Nitrogen Oxides Formation in a High Ammonia-Low Hydrogen Blend Using a Tangential Swirl Burner“.
- 54 Gaston u. a., „The biology of nitrogen oxides in the airways.“
- 55 Burns u. a., „Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances“.
- 56 Sillman, „Overview: Tropospheric Ozone, Smog and Ozone-NOx-VOC Sensitivity.“
- 57 Ebi und McGregor, „Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts“; Ainsworth u. a., „The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change“
- 58 Ainsworth u. a., „The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change“.

höhten Risiko für verschiedene Hautkrankheiten und Hauttumore.⁵⁹ Die erhöhte Belastung durch UV-B-Strahlung kann sich zudem störend auf marine Ökosysteme auswirken.⁶⁰

Freisetzung von Ammoniak: Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen

Im Laufe der Jahre wurden umfassende Vorschriften, Normen und Richtlinien für die Lagerung, den Umgang und den Transport von Ammoniak in der Chemie- und Düngemittelbranche festgelegt. Ammoniak wird als Massengut gehandhabt, das häufig unter Beachtung der geltenden Vorschriften und etablierten Verfahren von Terminals auf Schiffe und von Schiffen auf Terminals geladen wird. Jedoch bestehen eine Reihe von Unterschieden zwischen dem Transfer von Ammoniak als Ladung und als Brennstoff, und bislang gibt es noch keine Vorschriften und Verfahren zur Bunkerung von Ammoniak in der maritimen Industrie.⁶¹ Dieser Umstand führt zu einer nicht zu vernachlässigenden Wahrscheinlichkeit, dass es nach der allgemeinen Einführung von Ammoniak als Schiffskraftstoff kurz- und mittelfristig zu Freisetzungen kommen kann.

Ammoniak liegt bei Umgebungstemperatur und -druck in gasförmigem Zustand vor, wird aber in der Regel verflüssigt, um einen kostengünstigen Transport zu gewährleisten. Das Kondensieren erfolgt durch Komprimierung oder, was bei großen Ammoniakmengen üblicher ist, durch Kühlung (bei atmosphärischem Druck und -33,6 Grad Celsius wird es flüssig). Das bedeutet, dass sich das Ammoniak, anders als bei fossilen Brennstoffen, in jeder Situation, in der ein mit Ammoniak gefüllter Tank reißt, bricht oder geöffnet wird und der Inhalt normalen atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt ist, in Gas verwandelt. Ammoniak entweicht dann in die Atmosphäre oder ins Wasser. Art, Menge und Geschwindigkeit des Austretens können unterschiedlich sein. Eine geringe Menge Ammoniak entweicht bereits beim routinemäßigen Umfüllen zwischen Rohrleitungen und Behältern als relativ gleichmäßiger Siedegasstrom, jedoch gibt es schon etablierte Verfahren für die Erfassung dieser. Ein beschädigter Lagertank kann jedoch zu einer größeren Menge an Flash-Gas (Entspannungsverdampfung) oder sogar zu einer explosiven Entladung des Inhalts führen, die einen massiven Austritt zur Folge hat.⁶²

Ammoniak liegt bei Umgebungstemperatur und -druck in gasförmigem Zustand vor, wird aber in der Regel verflüssigt, um einen kostengünstigen Transport zu gewährleisten.

Ein Lagertank kann durch eine Vielzahl von Rissen und Schäden beeinträchtigt werden, zum Beispiel durch äußere Korrosion, schweißbedingte Probleme, Korrosionsrisse oder Versprödungsschäden. Solche materiellen Ausfälle sind jedoch ein bekanntes Risiko, das von der chemischen Industrie bereits weitgehend eingedämmt worden ist. Größere Risiken sind der Ausfall von Anlagen aufgrund von Wartungsproblemen oder der mechanischen Integrität sowie menschliches Versagen aufgrund mangelnder Ausbildung des Personals und/oder Abweichungen vom Betriebsverfahren. Dazu gehören physische Schäden durch äußere Einwirkungen, unsachgemäße Anschlüsse und Geräteausfälle sowie Druck- oder Temperaturabweichungen. Diese Situationen sind schwieriger zu verhindern.⁶³

Wenn Ammoniak durch Abkühlung verflüssigt wird (wie es in einem Hafen am wahrscheinlichsten ist) und in die Atmosphäre oder ins Wasser entweichen würde, gibt es normalerweise nur sehr wenig oder gar kein Flash-Gas. Das Ammoniak entweicht in einem langsamen, kontinuierlichen Prozess der Dissipation. Die daraus resultierende Freisetzung ist für den Menschen aufgrund des starken Geruchs und der Sichtbarkeit einer Wolke, die aus der in Gas umgewandelten Flüssigkeit aufsteigt, leicht zu erkennen. Sie kann daher, abgesehen von sehr großen Mengen, relativ leicht vermieden werden. Dennoch kann es erhebliche Schäden an den (maritimen) Ökosystemen verursachen.⁶⁴

Das Science and Technology Directorate des United States Department of Homeland Security führt seit 2010 Experimente zum Verhalten von Ammoniak bei Freisetzungen durch. Ammoniakgas wurde ausgewählt, weil es bei der Bewertung und Analyse der relevanten Gefahren als die risikoreichste Substanz ermittelt wurde. Diese Rangfolge basierte auf dem Volumen des transportierten Ammoniaks, der Anzahl der Unfälle und Verletzungen sowie der Toxizität, dem Dampfdruck, der Entflammbarkeit und den Sachschäden.⁶⁵ Die Experimente ergaben, dass Ammoniak bei einem katastrophalen Austritt sowohl als Dampf als auch als gefrierende, siedende Flüssigkeit freigesetzt würde. Eine Beobachtung ist, dass sich dichtes Ammoniakgas sehr weit ausbrei-

59 Norval u. a., „The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change“.

60 Williamson u. a., „The interactive effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and climate change on aquatic ecosystems“.

61 Liu, Yang, und Ng Kay Leng, „Ammonia as a marine fuel: Bunkering, safety and release simulations“.

62 Liu, Yang, und Ng Kay Leng.

63 Liu, Yang, und Ng Kay Leng.

64 Liu, Yang, und Ng Kay Leng.

65 US Department of Homeland Security, Home Science and Technology Directorate, „Securing Transportation of Ammonia—Agricultural Lifestock and Future Affordable, Clean Energy Source“.

tet – aus einem 3.785 Liter fassenden Tank trat es in einem Gebiet mit einem Durchmesser von 100 Metern und einer Höhe von 4,88 m aus, bevor es abflachte.⁶⁶ Wenn es auf Wasser verschüttet wird, verteilt sich etwa 30 % bis 40 % in der Luft, während sich die restlichen 60 % bis 70 % im Wasser auflösen.⁶⁷

Eine andere Studie der Nanyang Technological University untersuchte eine Reihe hypothetischer Szenarien, die bei der Bunkerung auftreten könnten. Dabei wurde festgestellt, dass die Gefahr sehr unterschiedlich ist, je nach der freigesetzten Menge, der Außentemperatur, der Höhe des Lecks, der umgebenden Oberfläche (Land oder Meer), der Windstärke und -richtung, der Tageszeit und der Nähe von bewohnten Gebieten. Während sich das Ammoniak bei kleineren Freisetzungen recht schnell verflüchtigt, d.h. innerhalb von Minuten, können sehr große Freisetzungen in den ersten Stunden nach der Freisetzung ein erhebliches Risiko für die Bevölkerung in der Umgebung darstellen.⁶⁸

Die Lebensdauer von Ammoniak in der Luft ist vergleichsweise kurz und reicht von Stunden bis zu Tagen, da es durch Winde transportiert und in Ammonium umgewandelt oder auf der Erdoberfläche abgelagert wird. Dies führt zu nachteiligen Auswirkungen wie Eutrophierung und Versauerung von Ökosystemen. Eine nicht reaktive Oberfläche, wie zum Beispiel eine glatte und trockene Betonoberfläche, kann die Absorption oder Adsorption einschränken, während natürliche Oberflächen, wie zum Beispiel die Vegetation, im Allgemeinen die trockene Ablagerung fördern.⁶⁹

Die Lebensdauer von Ammoniak in der Luft ist vergleichsweise kurz und reicht von Stunden bis zu Tagen

Auswirkungen auf den Rostocker Hafen

Nach Angaben der Rostock Port GmbH, dem Betreiber der Häfen in Rostock, liegen die Emissionen der Luftschadstoffe PM10, PM2,5, Ruß, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid in den Hafengebieten deutlich unter den gesetzlich zulässigen Werten. Allerdings sind keine Grenzwerte für Ultrafeinstaub definiert, der in den Häfen besonders problematisch erscheint.⁷⁰

Obwohl die von den Schiffen ausgehende Luftverschmutzung insgesamt beachtlich ist, dürften die kleinen Schiffstypen, auf die sich die CAMPFIRE-Projekte konzentrieren, einzeln keine große Luftverschmutzung verursachen. Im Jahr 2020 hatten kleine Schiffe (weniger als 500 BRZ) eine kombinierte Bruttoreaumzahl von 13.738.000; mittelgroße Schiffe (500-25.000 BRZ) von 241.664.000; große Schiffe (25.000-60.000 BRZ) von 478.280.000 und sehr große Schiffe (über 60.000 BRZ) von 732.321.000.⁷¹ Mit anderen Worten, kleine Schiffe machten nur 0,94 % des weltweiten Gesamtaufkommens aus, während kleine und mittlere Schiffe zusammen 17,42 % ausmachten. Da die von diesen Schiffen verursachte Luftverschmutzung nicht weit von diesen Prozentsätzen entfernt ist, kann davon ausgegangen werden, dass große Schiffe weltweit für die meisten Verschmutzungen verantwortlich sind.

In dieser Studie wurden daher nur die Auswirkungen der Umstellung eines großen Schiffes auf grünen Ammoniakbetrieb untersucht. Eine Studie über die Fähren Pride of Hull und Pride of Rotterdam (betrieben von Stena Line auf der Verbindung Harwich-Hoek van Holland), die von der Größe her der theoretischen grünen Ammoniakfähre sehr ähnlich sind, ergab, dass sie zusammen in einem Jahr im Hafen von Hoek van Holland folgende Luftverschmutzung verursachten: Stickoxide: 159,5 Tonnen; PM10: 5,8 Tonnen; und Schwefeldioxid: 3 Tonnen.⁷²

66 US Department of Homeland Security, Home Science and Technology Directorate.

67 Liu, Yang, und Ng Kay Leng, „Ammonia as a marine fuel: Bunkering, safety and release simulations“.

68 Liu, Yang, und Ng Kay Leng.

69 Liu, Yang, und Ng Kay Leng.

70 Rostock Port GmbH, „Nachhaltigkeitsbericht 2020“.

71 EQUASIS, „The 2020 World Merchant Fleet“.10,23]]],“issued“:{"date-parts":["2021"]}],“schema“:“<https://github.com/citation-style-language/schema/raw/master/csl-citation.json>“}

72 Holland Marine Equipment, „Shore-Connected Power for the Ferry/Ro-Ro Vessels in the Port of Rotterdam“.

Die oben genannten Zahlen beziehen sich nur auf die Generatoren der Fähren und nicht auf die Motoren. Eine Berechnung der Emissionen aus den Motoren eines vergleichbaren Schiffes wurde für die oben erwähnte Fähre Color Fantasy durchgeführt, die beim Manövrieren im Hafen schätzungsweise 0,47 Tonnen Schweröl und 0,09 Tonnen Marinegasöl verbraucht.⁷³ Daraus ergeben sich vernachlässigbare Mengen von etwa 8,86 kg Schwefeldioxid, 129 g Methan, 45 g Distickstoffoxid und 18,5 kg Stickoxide, die im Hafen ausgestoßen werden. Im Übrigen wird während der eigentlichen Überfahrt deutlich mehr emittiert; das Manövrieren im Hafen entspricht lediglich 0,66 % des Treibstoffs, der während der Fahrt Kiel-Oslo für den Antrieb verbraucht wird.⁷⁴

In dem Falle, in dem jedes Schiff, das den Rostocker Hafen anläuft, mit grünem Ammoniak betrieben würde, gäbe es keinerlei lokale Verschmutzung durch den Schiffsbetrieb.

Diese Berechnungen stellen ein Beispiel für die Verschmutzung dar, die vermieden werden könnte, wenn nur ein einziges Fährenpaar durch gleichwertige, mit grünem Ammoniak betriebene Schiffe ersetzt würde. In dem Falle, in dem jedes Schiff, das den Rostocker Hafen anläuft, mit grünem Ammoniak betrieben würde, gäbe es keinerlei lokale Verschmutzung durch den Schiffsbetrieb, abgesehen von der, die durch mögliche Treibstofflecks verursacht würden.

Ein großflächiger Austritt von Ammoniak könnte sehr verheerend sein. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es nicht möglich, Spekulationen über die Wahrscheinlichkeit und die quantitativen Gesamtauswirkungen im Hafen von Rostock anzustellen. Störfälle müssen in jedem Fall im Hafen und an Bord aller Schiffe, die Passagiere befördern, so weit wie möglich vermieden und ihre Auswirkungen eingedämmt werden, bevor Ammoniak als gängiger Kraftstoff für Schiffe in großem Umfang eingesetzt werden kann.

CAMPFIRE-Umfrage

Die von den CAMPFIRE-Partnern gestellten Fragen betrafen die Luftqualität in der Umgebung eines in Betrieb stehenden Schiffes, in den Häfen und in der Nähe der Einrichtungen für die Lagerung und Verteilung von Kraftstoff. Gefragt wurde nach dem Risiko, dass eine der verschiedenen Kraftstoffarten in einen Tankunfall verwickelt wird, der zu einer Verschmutzung im Hafen oder in dessen Umgebung führt. Des Weiteren wurde nach den theoretischen Auswirkungen eines Kraftstoffunfalls mit einem bestimmten Volumen (z. B. 10.000 Liter) auf die Umwelt gefragt. Auch andere Folgen für die menschliche Gesundheit wurden berücksichtigt.⁷⁵

Nach Angaben der CAMPFIRE-Partner führt der mit fossilen Brennstoffen betriebene Schiffsantrieb zu einer erheblichen Luftverschmutzung in der unmittelbaren Umgebung eines Schiffes und im Hafen. Es entsteht eine hohe Feinstaubbelastung (einschließlich Rußbildung, insbesondere bei schwerem Schiffsdiesel – die jedoch bei nassem Abgas reduziert wird), hohe Kohlendioxid-, Stickoxid- und Schwefeloxidemissionen. Die Besonderheiten des Abgases hängen von Betriebsparametern wie Verbrennungstemperatur, Luftverhältnis und Kraftstoffverbrauchsmenge sowie vom Baujahr des Motors und der Emissionsklasse ab. Schweres Heizöl ist der schlimmste Emittent, während Schiffsdiesel/Gasöl etwas besser abschneidet und der Erdgasbetrieb noch besser ist. Allerdings ist der Erdgasbetrieb mit dem Risiko verbunden, das Methan entweicht.⁷⁶

Die Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff würde zu einer besseren Luftqualität im Hafen führen.

73 Wisløff und Nervold, „Report for pilot “Ammonia as Fuel”“.

74 Statistics Norway, „Emission factors used in the estimations of emissions from combustion“.

75 Belltheus Avdic, „Antworten auf Fragenkatalog CAMPFIRE 11.1.3.3 zum Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener praktischer Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen in der Ostsee“.

76 Belltheus Avdic.

Demgegenüber würde die Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff zu einer besseren Luftqualität in der unmittelbaren Umgebung des in Betrieb befindlichen Schiffes und im Hafen führen. Generell würden viele toxische Emissionen vermieden – allerdings wäre, je nach Motortyp, Prozessführung, gegebenenfalls Ausstoß von Stickstoffoxiden (insbesondere N_2O), möglicherweise aufwendige Abgasnachbehandlung notwendig als Teil des ammoniakbetriebenen Antriebssystems. Der Ammoniak-Antrieb würde ebenfalls zu einer geringen Feinstaubbelastung (kein Dieselfuß), aber möglicherweise zu erheblichen Stickoxid-Emissionen führen.⁷⁷

Die CAMPFIRE-Partner gehen nicht davon aus, dass die Umstellung von fossilem Kraftstoff auf Ammoniaktrieb die Luftqualität in der Nähe von Kraftstofflager- und -verteilungsanlagen beeinträchtigen wird – zumindest nicht, solange es nicht zu größeren Freisetzungen kommt. Auf die Frage nach dem Risiko eines Lecks oder eines Tankunfalls antworteten die Partner, dass die Folgen einer Havarie mit Ammoniak zwar potenziell schwerwiegender, aber aufgrund der Sicherheitsmaßnahmen, die zwangsläufig ergriffen werden müssten, um die Sicherheit dieser neuen Kraftstoffart zu gewährleisten, voraussichtlich weniger wahrscheinlich wären. Auch die Auswirkungen der beiden Treibstoffarten wären unterschiedlich: Fossile Brennstoffe schwimmen auf dem Wasser und wären daher leichter zu reinigen, sind aber im Gegensatz zu Ammoniak auch leicht entzündlich. Ammoniak hingegen würde wahrscheinlich eine giftige Gaswolke bilden, die bis zu ihrer Auflösung in der Atmosphäre sehr gefährlich sein könnte.⁷⁸

Empfehlungen

Die Landwirtschaft ist mit einem Anteil von rund 95 % der Hauptemittent des Luftschadstoffs Ammoniak in Deutschland. Im Rahmen der europäischen NEC-Richtlinie haben sich die EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet, die Luftschadstoffe bis zum Jahr 2030 um einen bestimmten Prozentsatz gegenüber dem Referenzjahr 2005 zu reduzieren. Deutschland soll die Ammoniakemissionen in diesem Zeitraum um 29 Prozent senken. Zur Umsetzung der NEC-Richtlinie hat die Bundesregierung ein Nationales Luftreinhaltprogramm erstellt, in dem die Mindestmaßnahmen und deren Potenziale beschrieben sind.⁷⁹

Die mit Ammoniak als Kraftstoff verbundenen Verschmutzungsrisiken sind nicht höher als die mit fossilen Brennstoffen



Die Landwirtschaft ist mit einem Anteil von rund 95 % der Hauptemittent von Ammoniak in Deutschland. (Quelle: Pixabay)

Die Existenz einer bedeutsamen, weltweiten Ammoniakindustrie ist heute ein deutlicher Beweis dafür, dass die mit der Verwendung von Ammoniak verbundenen Risiken in einem industriellen Umfeld durch geeignete Ausrüstung, Konstruktion und Kontrollmaßnahmen auf ein akzeptables Niveau reduziert werden können.⁸⁰ Dennoch muss der Sicherheit im Umgang mit Ammoniak bei der Lagerung, der Bunkerung und dem Betrieb stets besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Außerdem müssen kontinuierlich und regelmäßig geeignete Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden.

Die Schwelle des akzeptablen Risikos ist zurecht anders, wenn es um Anwendungen geht, bei denen Passagiere befördert werden. Diese ist Frage entscheidend, wenn die für den Ammoniakbetrieb umzurüstenden Schiffe zur Beförderung von Menschen eingesetzt werden sollen. Wenige Studien modellieren oder messen die Gefahren eines Ammoniakaustritts. Zudem basieren sie zumeist noch auf theoretischen Überlegungen. Darüber hinaus können die Annahmen der Risikoabschätzung möglicherweise nicht für alle Staaten oder Häfen gleichermaßen getroffen werden.

Dennoch sollten die Risiken nicht überbewertet werden, denn die mit Ammoniak als Kraftstoff verbundenen Verschmutzungsrisiken sind nicht höher als die mit fossilen Brennstoffen – jedenfalls dann nicht, wenn die richtigen Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Diese sollten sorgfältig ausgearbeitet werden und die Ausarbeitung sollte ein breites Spektrum von Expert:innen und Interessengruppen einbeziehen. Kurz- und mittelfristig müssen die Vorkehrungen flexibel sein und sich an den Stand der Technik, praktische Beobachtungen und Erkenntnisse anpassen lassen.

77 Belltheus Avdic.

78 Belltheus Avdic.

79 Europäische Union, Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmenge für bestimmte Luftschadstoffe; Umweltbundesamt, „Ammoniak, Geruch und Staub“.

80 Cesaro, Wilkinson, und Eisfelder, „Power-to-X: A Closer Look at e-Ammonia“.

05

Infrastruktur

Infrastruktur

Die Umstellung von Schiffen auf Ammoniakbetrieb würde erhebliche Veränderungen an den Schiffen selbst sowie an den Hafenanlagen an Land erfordern. Diese Anpassungen an die physische Infrastruktur dürften wiederum Auswirkungen auf Geschwindigkeit, Leichtgängigkeit, Benutzerfreundlichkeit und Komfort des Schiffstransports haben. Diese Themen werden in mehreren Teilprojekten von CAMPFIRE 10 – „CF10_1 Logistik und Infrastruktur“, „CF10_2: Flexible Ammoniak-Betankungsanlage“, „CF10_3: Landseitige Ammoniak-Betankungsanlage“ und „CF10_4: ammoniakbetriebene Wasserstofftankstelle“ – ausführlich behandelt. Dieser Abschnitt konzentriert sich daher auf die akzeptanzbezogenen Aspekte.



Die Umstellung von Schiffen auf Ammoniakbetrieb würde erhebliche Veränderungen an den Schiffen selbst sowie an den Hafenanlagen an Land erfordern. (Quelle: Pixabay)

Die Anwendungsmöglichkeiten von Ammoniak

Ammoniak kann zum Betrieb einer Brennstoffzelle oder direkt als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor verwendet werden. Die Brennstoffzellentechnologie ist bereits so ausgereift, dass sie in Autos weit verbreitet ist, wenn auch mit Wasserstoff und nicht mit Ammoniak. Sie kann für kleine Schiffe angepasst werden, ist aber mit Sicherheit noch weit davon entfernt, erschwinglich oder ausgereift genug zu sein, um als Hauptantrieb für große Schiffe zu dienen. Zudem ist Wasserstoff als Kraftstoff nicht das Thema des CAMPFIRE-Projekts, dessen Schwerpunkt auf Ammoniak liegt. Ammoniak kann natürlich als Träger für Wasserstoff verwendet werden, der in Brennstoffzellen zum Einsatz kommen soll, aber Anwendungen dieser Komplexitätsgrad liegen außerhalb des Rahmens dieser Studie.

Die direkte Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor ist in vielerlei Hinsicht vielversprechender für sehr große Anwendungen. Der Verbrennungsmotor ist ein bewährter Antrieb, und viele Motoren können für den Betrieb mit Ammoniak nachgerüstet werden. Ammoniak lässt sich

auch leichter lagern und transportieren als Wasserstoff und ähnelt in Bezug auf Lagerung, Transport und Betankung eher den fossilen Brennstoffen. Darüber hinaus sind die Mechanismen eines Verbrennungsmotors denen von Ammoniak ähnlich, so dass Techniker:innen leichter umgeschult werden können, als wenn sie ein völlig neues Antriebssystem wie den Brennstoffzellenantrieb erlernen müssten. Mit anderen Worten: Ammoniak hat nicht nur wichtige objektive Vorteile, sondern ist auch ein hervorragender Kraftstoff für den Übergang.

Die direkte Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor ist in vielerlei Hinsicht vielversprechender für sehr große Anwendungen.

Ein Bericht des angesehenen Beratungsunternehmens DNV GL sieht Parallelen zwischen Ammoniak als Kraftstoff und der Situation von verflüssigtem Erdgas (LNG) in der jüngsten Vergangenheit und liefert wertvolle Erkenntnisse und Prognosen für das, was bei Ammoniak zu erwarten ist. Noch vor zwanzig Jahren galt LNG als radikaler Vorschlag für einen neuen Schiffskraftstoff, doch veränderte Vorschriften und neue Ziele zur Emissionsreduzierung führten schnell zu einem Wandel in der Wahrnehmung und den Erwartungen. Heute vervierfacht sich die LNG-Nachfrage im Seeverkehr alle fünf Jahre, und die Zahl der mit LNG betriebenen und LNG-bunkernden Schiffe ist drastisch gestiegen. Die gleichen Trends sind auch für Ammoniak zu erwarten.⁸¹

Anpassung der bestehenden Infrastruktur

Der Aufbau einer neuen Infrastruktur für den Ammoniaktransport dürfte sehr kosteneffizient sein. Eine Studie, in der der Transport von Wasserstoff, Ammoniak und Erdgas durch eine 100 km lange Pipeline zu einem Seeschiff von Standardgröße theoretisch untersucht wurde, ergab, dass der Transport von Ammoniak aufgrund der höheren Dichte und des geringeren Pipelinedurchmessers nur halb so teuer ist wie der von Erdgas. Die Kosten für Wasserstoff-Pipelines sind etwa doppelt so hoch wie die von Erdgas und viermal so hoch wie die von Ammoniak-Pipelines. Da bei dieser Analyse die Kosten für die Komprimierung für den Transport, die bei Ammoniak nicht erforderlich ist, nicht berücksichtigt werden, fällt der Kostenvergleich noch deutlicher aus.⁸² Da Ammoniak zudem leichter gelagert und transportiert werden kann als Wasserstoff, wäre die Umrüstung von Lagertanks, Pipelines, Kraftstofftanks und Transportfahrzeugen billiger. Gleichzeitig wären die Lager- und Kraft-

81 Atchison, „Ammonia Infrastructure“.

82 Atchison.

stofftanks größer als bei Diesel oder Schweröl, da diese einen mehrfach höheren Energiegehalt aufweisen als Ammoniak.⁸³

Der Aufbau einer neuen Infrastruktur für den Ammoniaktransport dürfte sehr kosteneffizient sein



Der Transport von Ammoniak durch Pipelines ist nur halb so teuer wie der von Erdgas (Quelle: Pixabay)

Durch die Umrüstung bestehender Anlagen, insbesondere für Flüssigerdgas (LNG), kann ein großer Teil der Infrastruktur für den Transport und die Lagerung von Ammoniak bereitgestellt werden. Solche Anlagen umfassen bereits viele der Elemente, die für den sicheren und effizienten Transport und die Lagerung von Ammoniak, nicht aber von fossilen Brennstoffen, erforderlich sind, wie z. B. ein System zum Umgang mit austretendem Boil-off-Gas oder Flash-Gas. Die Betankung von LNG erfordert doppelt so viel Platz wie Schweröl oder Marinegasöl, um die gleiche Energiemenge zu liefern, und Ammoniak benötigt dreimal so viel Platz. Andererseits ist Ammoniak korrosiver für Tanks und Pipelines, aber weniger entflammbar als LNG (Schweröl/Marinegasöl hat keines dieser Probleme).⁸⁴

Auswirkungen auf den Rostocker Hafen

Wie im obigen Abschnitt über gesundheitliche Auswirkungen erwähnt, befindet sich Ammoniak bei atmosphärischem Druck und normalen Außen- und Raumtemperaturen (über -33,6 Grad Celsius) in einem gasförmigen Zustand. In Anbetracht seiner Toxizität und der möglichen Schädigung von Ökosystemen bei hohen Konzentrationen sowie der möglichen Nähe von bewohnten Gebieten zu Lager- und Transporteinrichtungen, dürfte jede Gefahr eines Austritts zu einer erheblichen Besorgnis der örtlichen Bevölkerung führen.

Auch die Kosten müssen berücksichtigt werden. Auf der Grundlage von Angaben von Zulieferern und Werften wurde in der Studie zur Umstellung einer großen Kiel-Oslo-Fähre auf Ammoniakbetrieb geschätzt, dass die Betriebskosten um 15 % hö-

her wären als beim Betrieb mit fossilen Brennstoffen. Dabei sind die zusätzlichen Kosten für den Ammoniakbrennstoff nicht berücksichtigt, da sich diese nur schwer beziffern lassen.⁸⁵ (Die Differenzkosten, die sich aus der Ersetzung fossiler Brennstoffe durch Ammoniak ergeben, hängen von den schwankenden Kosten für Schweröl und den derzeit sinkenden Kosten für Ammoniak ab.)

In derselben Studie werden die einmaligen Investitionskosten für die Umrüstung der Motoren (die mehr als die doppelte Kapazität der auf der Strecke Rostock-Gedser verkehrenden Fähren hätten) auf sechs Millionen Euro geschätzt. Darüber hinaus müssten neue Ausrüstungen für den Umgang mit Ammoniak auf dem Schiff und an Land installiert werden, darunter Komponenten wie Abgasreiniger, Belüftungssysteme, Pumpen, Leitungen, Tanks und Bunkersysteme. Die damit verbundenen Kosten für Konstruktion, Fertigung und Installation wurden auf 14,4 Millionen Euro geschätzt.⁸⁶

Mit anderen Worten: Die Kosten für eine vollständige Umstellung des Schiffsantriebs auf Ammoniak wären allein für die beiden Schiffe beträchtlich. Die Kosten für die Infrastruktur an Land wären noch viel höher, da die bestehende Infrastruktur für Flüssigerdgas oder fossile Brennstoffe umfunktioniert werden müsste, wobei zumindest einige Anlagen von Grund auf neu gebaut werden müssten. Diese zusätzlichen finanziellen Kosten würden wahrscheinlich die Wirtschaftstätigkeit dämpfen, da bestimmte Tätigkeiten aufgrund der höheren Kosten unrentabel und aus dem Markt gedrängt würden. Dies würde zu einer geringeren Wertschöpfung und weiterhin zu einem Rückgang der Beschäftigung führen, was sich sehr wahrscheinlich auf die Akzeptanz des Hafens in der Öffentlichkeit auswirken würde.

Natürlich würden die Kosten pro Einheit umso niedriger ausfallen, je mehr Schiffe von der landseitigen Infrastruktur bedient werden können. Je mehr sich Ammoniak als Brennstoff, aber auch als Energiespeicher im Allgemeinen durchsetzt, desto vielfältiger werden die Verwendungsmöglichkeiten in den Häfen sein, und desto umfangreicher wären die Aktivitäten, auf die sich die Infrastrukturkosten verteilen würden.

Natürlich würden die Kosten pro Einheit umso niedriger ausfallen, je mehr Schiffe von der landseitigen Infrastruktur bedient werden können.

Zu den vielversprechenden Ammoniak-Energietechnologien gehören ammoniakbetriebene Verbrennungsturbinen, die in Kombikraftwerken zur effizienten Umwandlung von Ammoniak in Strom eingesetzt werden können, sowie Tankstellen,

83 Handelsblatt, „Möglicher Ersatzstoff für Gas: Ammoniak für Schiffsmotoren – hilft das dem Klimaschutz?“

84 Liu, Yang, und Ng Kay Leng, „Ammonia as a marine fuel: Bunkering, safety and release simulations“.

85 Wisløff und Nervold, „Report for pilot “Ammonia as Fuel”“.

86 Wisløff und Nervold.

die Ammoniaklieferungen entgegennehmen und es bei Bedarf mit Plasmacrackern in Wasserstoff für weitere Anwendungen umwandeln können. Da Ammoniak in den meisten Fällen die geeignetste Art ist, Wasserstoff zu speichern und zu transportieren, kann es außerdem als Träger für die Versorgung einer Vielzahl von Anwendungen genutzt werden, die reines Wasserstoffgas benötigen, wie z.B. verschiedene Fertigungsaktivitäten und technologische Prozesse oder als Ausgangsstoff für Brennstoffzellen-Elektromotoren, um nur einige zu nennen.

CAMPFIRE-Umfrage

Nach Angaben der CAMPFIRE-Partner:innen könnte für Ammoniak-Tankschiffe ein größerer Sicherheitsabstand erforderlich sein, damit sie nicht zusammen mit anderen Schiffen durch enge Durchfahrten geschleust werden, wodurch der reibungslose Verkehr insgesamt beeinträchtigt werden könnte. Auch die Kraftstofftanks müssten für die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf Ammoniak erheblich angepasst und vergrößert werden.⁸⁷

Empfehlungen

Es ist selbstverständlich, dass mit größter Sorgfalt vorgegangen werden muss, um die Sicherheit zu gewährleisten und die Bedenken der örtlichen Bevölkerung zu minimieren. Dies erfordert notwendigerweise eine große Anzahl gut durchdachter,

bewährter und im Idealfall redundanter Maßnahmen. Diese sollten auf den Konzepten, Mechanismen und Praktiken aufbauen, die in den Industriesektoren für den Transport, die Lagerung und die Verwendung von Ammoniak bereits gut etabliert sind. Außerdem müssen sie den Arbeitnehmer:innen und Anwohner:innen klar vermittelt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die lokale Akzeptanz sind die Auswirkungen der höheren Investitions- und Betriebskosten auf die Wirtschaftstätigkeit und die Beschäftigung. In gewissem Maße ist ein negativer Effekt unausweichlich, und im Idealfall sollte die örtliche Bevölkerung darauf gut vorbereitet sein. Wie bereits im Kapitel zum Beschäftigungspotenzial erwähnt, sollten auch Maßnahmen ergriffen werden, um beschäftigungsrelevante Probleme abzumildern und die Wirtschaftstätigkeit anzukurbeln.

Dazu sollten Maßnahmen gehören, die eine Diversifizierung der Hafenwirtschaft ermöglichen und neue Anwendungen fördern. Die Errichtung der entsprechenden Betriebe und Einrichtungen würde eine konzertierte Anstrengung der Hafenbehörde, der Raumplanung und der lokalen Behörden sowie der privaten Unternehmen erfordern, die letztlich einen Großteil der Bauarbeiten und den damit verbundenen Geschäften durchführen würden.

87 Belltheus Avdic, „Antworten auf Fragenkatalog CAMPFIRE 11.1.3.3 zum Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener praktischer Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen in der Ostsee“.

06

Treibhausgas- emissionen

Treibhausgasemissionen

Die Auswirkungen der lokalen Treibhausgasemissionen auf die Akzeptanz in der Bevölkerung sind aus mehreren Gründen kompliziert. Zum einen sind Treibhausgasemissionen oft nur auf abstrakter und globaler Ebene wahrnehmbar und in der alltäglichen Umgebung unsichtbar – im Gegensatz zur Luftverschmutzung gefährden die wichtigsten Treibhausgase im Allgemeinen nicht direkt die menschliche Gesundheit. Hinzu kommt, dass Treibhausgasemissionen in der Regel positiv mit der Wirtschaftsleistung korreliert sind, die oft die Quelle hochgeschätzter Arbeitsplätze und des allgemeinen wirtschaftlichen Wohlstands ist. Es gibt auch nicht immer vollständige Informationen darüber, welche Arten von Aktivitäten die größte Menge an Emissionen verursachen, oder den genauen Unterschied zwischen Treibhausgasen und schädlicher Luftverschmutzung. Schließlich – und dies ist ein spezifisches Problem der Verwendung von Ammoniak als Brennstoff – gibt es neben Kohlenstoffdioxid noch andere Treibhausgase, die gleichermaßen schädlich oder sogar schlimmer sein können, aber in den Medien weit weniger Beachtung finden.

Emissionen und Akzeptanz

Auf der Makroebene ist es selbstverständlich, dass fossile Brennstoffe eine äußerst praktische und billige Energieform sind, die den Menschen in den letzten Jahrzehnten großen Wohlstand und Komfort ermöglicht hat. Unsere Gesellschaft ist auf Produktions-, Konsum- und Transportmethoden aufgebaut, die weitgehend oder vollständig von der leichten Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe abhängen. Und während die Öffentlichkeit in der Regel behauptet, den Zusammenhang zwischen dem Verbrauch fossiler Brennstoffe und den Treibhausgasemissionen zu verstehen und letztere reduzieren zu wollen, ist es hinreichend dokumentiert, dass im Allgemeinen keine Bereitschaft herrscht, wesentliche spezifische Reduzierungen der ersteren in Kauf zu nehmen.⁸⁸



Unsere Gesellschaft hängt weitgehend von der leichten Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe ab (Quelle: Pixabay)

Selbst wenn sich die Bürger:innen in gewissem Maße für tatsächliche und spezifische Treibhausgasemissionen interessieren (im Gegensatz zu ihrer abstrakten Ablehnung), sind sie möglicherweise stärker betroffen, wenn sie sich für diese Emissionen direkt (z. B. durch die Nutzung eines eigenen Autos) oder indirekt (durch die Arbeit in einem Produktionsbetrieb) verantwortlich fühlen beziehungsweise wenn die Emissionen in ihrer Umgebung oder von Menschen in ihrer Gemeinschaft erzeugt werden. Wenn die Bevölkerung allgemein anerkennt, dass diese Emissionen schädlich sind und verringert werden müssen, ist es nur logisch, dass sie sich über eine Verringerung der wichtigsten Emissionsquellen in ihrer Umgebung oder Gemeinde freuen würde. Mit anderen Worten: Ein Vorhaben oder eine Aktion, die zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen in einer Stadt oder einem Hafen führt, wird von der örtlichen Bevölkerung aus diesem Grund wahrscheinlich zumindest teilweise begrüßt.

Treibhausgasemissionen durch Ammoniakmotoren

Ammoniak wird in der Regel nach dem Haber-Bosch-Verfahren hergestellt, das sehr viel Energie verbraucht und für sich allein 1,1 % der weltweiten Treibhausgasemissionen ausmacht.⁸⁹ Für die vorliegende Studie gehen wir jedoch davon aus, dass ausschließlich grünes Ammoniak als Brennstoff verwendet wird und dieses völlig klimaneutral hergestellt, transportiert, gelagert und gebunkert wird, so dass diese, ansonsten sehr erheblichen Emissionen, neutralisiert werden. Darüber hinaus gehen wir davon aus, dass die entsprechenden Motoren und sämtliche Komponenten klimaneutral hergestellt, transportiert, montiert und schließlich entsorgt werden können.

Verbrennungs- oder Brennstoffzellenmotoren, die mit Ammoniak (ggf. unter Zugabe von Wasserstoff) als Kraftstoff betrieben werden, verursachen keine Kohlenstoffemissionen, da die betreffenden Stoffe keine Kohlenstoffatome enthalten. Allerdings können Ammoniak-Verbrennungsmotoren immer noch unerwünschte Emissionen von drei klimawirksamen Gasen erzeugen, nämlich Stickoxide (NO_x), Distickstoffdioxid (N_2O) und Wasserstoff (H_2).

Ammoniakmotoren verursachen keine Kohlenstoffemissionen

88 Levi u. a., „Analyse: Klimaschutz und Verkehr“.

89 Handelsblatt, „Möglicher Ersatzstoff für Gas: Ammoniak für Schiffsmotoren – hilft das dem Klimaschutz?“

Da bisher noch keine Ammoniak-Schiffsmotoren gebaut wurden, gibt es keine präzisen, quantitativen empirischen Daten über diese Emissionen. Versuche in kleinem Maßstab haben gezeigt, dass die Menge der Emissionen unter anderem von einer Vielzahl chemischer Reaktionen, der Intensität der eingesetzten Wärmeleistung und einem komplexen Zusammenspiel zwischen emittiertem Stickstoffoxid und Distickstoffoxid abhängt.⁹⁰ Im Allgemeinen sind die meisten Treibhausgase an vielen komplizierten Reaktionen mit dem Sonnenlicht und anderen Stoffen beteiligt und können in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre sehr unterschiedlich reagieren. Außerdem unterliegen sie oder produzieren Dominoeffekten und Multiplikationen, die unbeständig und schwer zu messen oder vollständig vorherzusagen sind.

Stickstoffoxide (NO_x)

Die bei der Verbrennung von Ammoniak entstehenden Stickoxide (NO_x) sind in der Regel Stickstoffoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) und Distickstoffoxid (N₂O). Die erstgenannten sind keine Treibhausgase, obwohl sie eine wichtige Rolle bei der Bildung von troposphärischem Ozon spielen, das selbst ein starkes Treibhausgas ist. Ozon ist in der Troposphäre kurzlebig, beeinflusst aber das Klima nicht nur durch eine verstärkte Erwärmung, sondern auch durch Auswirkungen auf Verdunstungsraten, Wolkenbildung, Niederschlagsmengen und die atmosphärische Zirkulation. Außerdem schadet es Menschen und Ökosystemen auch unmittelbar, wie oben im Abschnitt über Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen beschrieben.⁹¹

Distickstoffoxide (N₂O)

Distickstoffoxid ist ein natürlicher Bestandteil des atmosphärischen Stickstoffkreislaufs, jedoch ist seine Konzentration durch menschliche Aktivitäten – hauptsächlich in der Landwirtschaft, aber auch im Verkehr – stark angestiegen.⁹² Distickstoffoxid verbleibt im Durchschnitt für 114 Jahre in der Atmosphäre und hat ein Treibhauspotenzial, welches fast 300-mal höher ist als das von Kohlendioxid.⁹³

Wasserstoff (H₂)

Wasserstoff ist selbst kein Treibhausgas, kann aber mit anderen Verbindungen in der Atmosphäre reagieren und einen – wenn auch geringen – Treibhauseffekt erzeugen. Wasserstoff kann oxidieren, indem er mit dem Hydroxylradikal (OH) reagiert, das natürlicherweise in der Atmosphäre vorkommt, und so zu

einem Ungleichgewicht in den troposphärischen Konzentrationen von Methan und Ozon führen, die beide sehr starke Treibhausgase sind.⁹⁴ Wenn Wasserstoff mit OH reagiert, bleibt weniger davon zur Neutralisierung von Methan zur Verfügung. Dadurch verlängert sich die durchschnittliche Lebensdauer von Methan in der Atmosphäre, was sein klimawärmendes Potenzial erhöht. Dieser Effekt macht etwa die Hälfte des Treibhausgaspotenzials von Wasserstoff aus.

Wenn reines Wasserstoffgas mit OH reagiert, bildet es atomaren Wasserstoff und Wasser. Der Wasserstoff führt zur Bildung von troposphärischem Ozon. Das Wasser in Form von Wasserdampf kann die Infrarot-Strahlungsfähigkeit der Stratosphäre erhöhen, so dass mehr Wärme aus der Stratosphäre verloren geht und diese effektiv abkühlt. Paradoxiertweise verringert die Senkung der Stratosphärentemperatur die Gesamtenergieemissionen aus der Atmosphäre und wirkt sich insgesamt erwärmend auf das Klima aus.⁹⁵

Treibhausgasemissionen durch Motoren mit fossilen Brennstoffen

Die Hauptquelle der Treibhausgasemissionen von Schiffen sind die Abgase, welche auf rund eine Milliarde Tonnen Kohlendioxidäquivalente jährlich geschätzt werden. Berücksichtigt man auch die Emissionen aus der Herstellung der Brennstoffe, so belaufen sich die Gesamtemissionen auf 1,25 bis 1,5 Milliarden Tonnen Kohlendioxidäquivalente. Dies entspricht etwa 3 % der 50 Milliarden Tonnen anthropogener Treibhausgasemissionen, die jedes Jahr entstehen. Seit 1970 hat der Seeverkehr jährlich um drei Prozent zugenommen und die Energieeffizienz hat sich jährlich um ein Prozent verbessert.⁹⁶



Schiffabgase entsprechen etwa 3 % der 50 Milliarden Tonnen jährlicher anthropogener Treibhausgasemissionen (Quelle: Pixabay)

90 Alnasif u. a., „Experimental and Numerical Analyses of Nitrogen Oxides Formation in a High Ammonia-Low Hydrogen Blend Using a Tangential Swirl Burner“.

91 Zhang u. a., „Substantial Nitrogen Oxides Emission Reduction from China Due to COVID-19 and Its Impact on Surface Ozone and Aerosol Pollution“.

92 United States Environmental Protection Agency, „Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks“.

93 United States Environmental Protection Agency.

94 Ocko und Hamburg, „Climate consequences of hydrogen leakage“.

95 Derwent u. a., „Global environmental impacts of the hydrogen economy“.

96 Lindstad u. a., „Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels“.

Kleine Schiffe

Die Treibhausgasemissionen von kleinen Schiffen lassen sich nur schwer präzise abschätzen, da es eine große Vielfalt an Typen und Größen gibt. Eine Klassifizierung legt nahe, dass es drei Hauptkategorien von Merkmalen gibt, die die Emissionen bestimmen.⁹⁷

- Reisebedingungen, die die Motorlast bestimmen:
 - » Form
 - » Verdrängung
 - » Geschwindigkeit
 - » Tiefgang
- Verbrennungsbedingungen, die sich auf die Leistung des Motors auswirken:
 - » Motortyp
 - » Art des Kraftstoffs
 - » Wirkungsgrad des Motors
- Bedingungen der Lebensdauer:
 - » Jährlicher Betriebsplan
 - » Tatsächliche Betriebszeit des Schiffes

Wie bereits im Abschnitt über die Luftqualität und die gesundheitlichen Auswirkungen erwähnt, machen kleine Schiffe (mit einer Gesamttonnage von weniger als 500) nur 0,94 % des weltweiten Gesamtaufkommens aus. Es ist davon auszugehen, dass die Menge der von diesen Schiffen verursachten Treibhausgasemissionen nicht weit von diesem Prozentsatz entfernt ist. Der Rostocker Hafen, ein bedeutender Fracht-, Umschlag- und Fährhafen, dürfte durch ein ähnliches Vorherrschen von Großschiffen gekennzeichnet sein.

Große Schiffe

Der Kohlendioxid-Fußabdruck bestimmter großer Schiffe ist schwer zu ermitteln, da die Reedereien diese Informationen in der Regel nicht veröffentlichen. Die oben erwähnte Kreuzfahrtschiff M/S Color Fantasy, die Kiel und Oslo verbindet, stößt bei einer Hin- und Rückfahrt von jeweils 750 km 569 Tonnen Kohlendioxid aus. Eine Fähre von Rostock nach Gedser legt eine Strecke von etwa 50 km zurück und würde daher verhältnismäßig weniger emittieren. Zum Vergleich: Die deutschen Pro-Kopf-Emissionen lagen im Jahr 2021 bei 11,2 Tonnen CO₂-Äquivalenten.⁹⁸

Wie bereits im Abschnitt über die Modellschiffe erwähnt, kann die M/S Color Fantasy 2605 Passagiere und 750 Autos befördern, während die bestehenden Fähren auf der Strecke Rostock-Gedser eine Kapazität von 1300 Passagieren und 96 LKWs oder 460 Autos haben. Das bedeutet, dass die Emissionen pro



Große Frachtschiffe sind oft die Transportlösung, die den geringsten Kohlenstoffausstoß pro Kilometer und Einheit verursacht (Quelle: Pixabay)

Person geringer sind, als sie auf den ersten Blick erscheinen mögen – und auf jeden Fall viel geringer als die Emissionen, die von all diesen Personen verursacht worden wären, wenn sie die gleiche Strecke direkt mit dem Auto zurückgelegt hätten. In ähnlicher Weise sind große Frachtschiffe oft die Transportlösung, die den geringsten Kohlenstoffausstoß pro Kilometer und Einheit verursacht.⁹⁹

Große Yachten sind jedoch eine andere Geschichte: Laut einer Studie stößt eine Superyacht mit ständiger Besatzung, Hubschrauberlandeplatz, U-Booten und Pools etwa 7.020 Tonnen CO₂ pro Jahr aus, was sie aus ökologischer Sicht zum mit Abstand schlechtesten Vermögensgegenstand im Einzelbesitz macht. Ein einziger Milliardär, Roman Abramovich, war 2018 für 33.859 Tonnen CO₂-Emissionen verantwortlich, von denen mehr als zwei Drittel auf seine Yachten entfielen. Mit anderen Worten: eine durchschnittliche Superyacht stieß 2018 mehr als 600-mal so viel CO₂ aus wie ein durchschnittlicher Deutscher (bei einem durchschnittlichen Jahresausstoß von 11,2 Tonnen, siehe oben) – und die Yachten von Roman Abramovich mehr als 3000-mal so viel.

Eine durchschnittliche Superyacht stieß 2018 mehr als 600-mal so viel CO₂ aus wie ein durchschnittlicher Deutscher

Auswirkungen auf den Rostocker Hafen

Wenn wir davon ausgehen, dass es möglich ist, grünes Ammoniak zu produzieren, ohne dass bei der Herstellung, dem Transport, dem Cracken oder der Verbrennung des entstehenden Wasserstoffs Treibhausgase freigesetzt werden – das heißt,

97 Jeong, Woo, und Oh, „Simulation of Greenhouse Gas Emissions of Small Ships Considering Operating Conditions for Environmental Performance Evaluation“.

98 Umweltbundesamt, „Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland durchschnittlich?“

99 European Environment Agency, „Rail and Waterborne — Best for Low-Carbon Motorised Transport“.

wir gehen davon aus, dass 100 % der Treibhausgasemissionen durch die Substitution vermieden werden – dann lässt sich die Frage, wie viele Treibhausgasemissionen durch den Ersatz fossiler Brennstoffe durch Ammoniak vermieden werden, einfach dadurch beantworten, dass man berechnet, wie viele Emissionen durch die Verwendung dieser fossilen Brennstoffe überhaupt verursacht werden. Natürlich hängt dies wiederum stark von der Art des Schiffs und seiner Nutzung ab.

Gleichzeitig birgt die Umstellung auf den Betrieb mit Ammoniak das Risiko einer erhöhten Produktion anderer Treibhausgase, insbesondere von Distickstoffoxid (N_2O). Die genaue Menge des erzeugten N_2O würde von einer Reihe von Parametern abhängen, die noch nicht vollständig bekannt sind und noch eingehender untersucht werden müssen.

Empfehlungen

Während Abgasnachbehandlungssysteme eine vielversprechende Lösung für NO_x -Emissionen und Ammoniaklecks darstellen, sind N_2O -Emissionen nicht so einfach zu neutralisieren. Dies ist ein Problem, das idealerweise in erster Linie technisch gelöst werden sollte, damit Ammoniak sein Potenzial als Schlüssel zur klimaneutralen Seeschifffahrt entfalten kann.¹⁰⁰ Um Anreize für die Entwicklung geeigneter Schiffsmaschinen

zu schaffen, könnte N_2O beispielsweise in die Kohlenstoffpreispolitik für den Seeverkehr einbezogen oder durch strenge Emissionsnormen auf der Grundlage von Kohlendioxidäquivalenten auf ein tolerierbares Maß begrenzt werden. Diese sollten so gestaltet werden, dass die Entwicklung und der breite Einsatz von Technologien zur Sammlung von N_2O innerhalb eines möglichst kurzen Zeitrahmens gefördert werden.

Eine weitere Option sind ermäßigte Hafengebühren für Schiffe, die bestimmte ökologische Mindeststandards einhalten. Diese Lösung funktioniert selbstverständlich am besten, wenn sie von allen Häfen in der Region oder auf dem Kontinent übernommen wird. Das Prinzip des NO_x -Emission Kontrollgebiets für die Ost- und Nordsee könnte auch auf N_2O ausgedehnt werden, und zwar auf alle Schiffe und nicht nur auf neu gebaute, und es könnte strenger durchgesetzt werden.

Die Vorteile in Bezug auf die Treibhausgasemissionen, die sich aus der Umstellung des Schiffsbetriebs von fossilen Brennstoffen auf Ammoniak ergeben, sollten klar dokumentiert und der lokalen Bevölkerung mitgeteilt werden, insbesondere in Situationen, in denen die Umstellung die Wirtschaftstätigkeit oder die Beschäftigung gefährdet. Darüber hinaus sollte das Potenzial für eine wirtschaftliche Expansion durch bisher ungenutzte neue ammoniakorientierte Aktivitäten hervorgehoben werden.

07

Fazit

Fazit

Grünes Ammoniak ist ein vielversprechender Kandidat für die mittel- und langfristige Dekarbonisierung von problematischen Sektoren wie dem Verkehr. Es zeichnet sich jedoch durch eine Reihe von unpraktischen Eigenschaften aus, nicht zuletzt durch seine Flüchtigkeit und potenzielle Toxizität. Seine Neuheit bedeutet, dass es viele Unwägbarkeiten in Bezug auf seine breite Einführung gibt. All dies erschwert die öffentliche Akzeptanz, die eine wichtige Voraussetzung für die Verbreitung ist. Die umfassende Nutzung von grünem Ammoniak als Schiffskraftstoff würde daher eine Reihe von Maßnahmen zur Förderung der Akzeptanz erfordern. Dazu gehört in erster Linie eine umfassende Sensibilisierung durch Informationskampagnen und kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit. Dabei sollte sowohl auf Ammoniak im Allgemeinen als auch auf die spezifischen Lösungen und Umstände seiner Herstellung, Lagerung und Verteilung vor Ort eingegangen werden. Weitere relevante Maßnahmen wären die Umsetzung gut recherchierter und gut dokumentierter Sicherheitsmaßnahmen und die Gewährleistung einer angemessenen Ausbildung für Personen, die direkt mit Ammoniak umgehen.

Grünes Ammoniak ist ein vielversprechender Kandidat für die mittel- und langfristige Dekarbonisierung von problematischen Sektoren wie dem Verkehr.

Wenn die richtigen Maßnahmen ergriffen werden, sollte grünes Ammoniak im Großen und Ganzen nicht gefährlicher oder schwieriger zu handhaben sein als fossile Brennstoffe. Die Sicherstellung, dass dies von der Öffentlichkeit richtig verstanden wird, wird eine ebenso entscheidende Aufgabe bei der Energiewende sein wie jede technische Lösung.

06

Literatur- verzeichnis

Literaturverzeichnis

- Ainsworth, Elizabeth, Craig Yendrek, Stephen Sitch, William Collins, und Lisa Emberson. „The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change“. Annual review of plant biology 63 (9. Februar 2012): 637–61. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>.
- Alnasif, A., S. Mashruk, M. Kovaleva, P. Wang, und A. Valera-Medina. „Experimental and Numerical Analyses of Nitrogen Oxides Formation in a High Ammonia-Low Hydrogen Blend Using a Tangential Swirl Burner“. Carbon Neutrality 1, Nr. 1 (23. Juni 2022): 24. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00021-9>.
- Atchison, Julian. „Ammonia Infrastructure: Panel Wrap-up from the 2020 Ammonia Energy Conference – Ammonia Energy Association“, 22. Januar 2021. <https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-infrastructure/>.
- Belltheus Avdic, Dàmir. „Antworten auf Fragenkatalog CAMPFIRE 11.1.3.3 zum Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener praktischer Anwendungen von Ammoniak auf Schiffen in der Ostsee“. Unveröffentlichte Umfrage. Berlin, Juni 2022. Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. Berlin.
- Bogdanov, Dmitrii, Manish Ram, Arman Aghahosseini, Ashish Gulagi, Ayobami Solomon Oyewo, Michael Child, Upeksha Caldera, u. a. „Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability“. Energy 227 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>.
- Burns, Douglas A, Julian Aherne, David A Gay, und Christopher Lehmann. „Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances“. Atmospheric Environment 146 (2016): 1–4.
- Cames, Martin, Nora Wissner, und Jürgen Sutter. „Ammonia as a marine fuel: Risks and perspectives“. Berlin: Öko-Institut, Juni 2021.
- CAMPFIRE. „CF07: Entwicklung des Funktionsmusters einer Ammoniak-betriebenen Sport Yacht mit Hybridsystem aus Festoxid-Brennstoffzelle und Motor“. Zugegriffen 19. September 2022. <https://wir-campfire.de/cf07/>.
- . „CF08_1: Entwicklung eines Konzeptes für den emissionsfreien Betrieb eines Binnenschiffes mit dem Kraftstoff Ammoniak“. Zugegriffen 30. September 2022. https://wir-campfire.de/cf08_1/.
- . „CF09: GreenBalticCruising: Erarbeitung eines Konzeptes für die Implementierung der CAMPFIRE-Technologien für die emissionsfreie maritime Mobilität im Ostseeraum“. Zugegriffen 24. April 2023. <https://wir-campfire.de/cf09/>.
- . „Weiterentwicklung der Strategie für Projektlinie CF08 NH3-Binnenschiff (Verbundvorhaben CF08_1 und CF08_2, CF08_3 in Planung)“. Unveröffentlicht, 28. April 2022.
- Cesaro, Zac, Ian Wilkinson, und Andreas Eisfelder. „Power-to-X: A Closer Look at e-Ammonia“. München: Siemens Energy, 2021. Color Line. „M/S Color Fantasy“. Zugegriffen 15. September 2022. <https://www.colorline.com/about-us/color-fantasy>.
- Cozzi, Laura, und Brian Motherway. „The Importance of Focusing on Jobs and Fairness in Clean Energy Transitions“. International Energy Agency, 6. Juli 2021. <https://www.iea.org/commentaries/the-importance-of-focusing-on-jobs-and-fairness-in-clean-energy-transitions>.
- Cruise Market Watch. „Growth“. Zugegriffen 12. August 2022. <https://cruisemarketwatch.com/growth/>.
- Derwent, Richard, Peter Simmonds, Simon O Doherty, Alistair Manning, William Collins, und David Stevenson. „Global environmental impacts of the hydrogen economy“. International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications 1, Nr. 1 (2006): 57.
- Ebi, Kristie L., und Glenn McGregor. „Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts“. Environmental Health Perspectives 116, Nr. 11 (November 2008): 1449–55. <https://doi.org/10.1289/ehp.11463>.
- Eidesvik. „Viking Energy with Ammonia-Driven Fuel Cell“, 3. Juni 2020. <https://eidesvik.no/viking-energy-with-ammonia-driven-fuel-cell/>.

- EQUASIS. „The 2020 World Merchant Fleet“, 2021. <https://www.equasis.org/Fichiers/Statistique/MOA/Documents%20avai-ables%20on%20statistics%20of%20Equasis/Equasis%20Statistics%20-%20The%20world%20fleet%202020.pdf>.
- Europäische Union. Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchst­mengen für bestimmte Luftschadstoffe (2001). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A32001L0081>.
- European Environment Agency. „Rail and Waterborne — Best for Low-Carbon Motorised Transport“. Briefing, 24. März 2021. <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>.
- Gallucci, Maria. „Why the Shipping Industry Is Betting Big on Ammonia“. IEEE Spectrum, 23. Februar 2021. <https://spectrum.ieee.org/why-the-shipping-industry-is-betting-big-on-ammonia>.
- Gaston, B, J M Drazen, J Loscalzo, und J S Stamler. „The biology of nitrogen oxides in the airways.“ American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 149, Nr. 2 (Februar 1994): 538–51. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.149.2.7508323>.
- Gérard, Frank, Jan Michalski, Luc Van Nuffel, Matthias Altmann, Tycho Smit, Jessica Yearwood, und Ondřej Černý. „Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans: Final Report“. Trinomics, Juli 2020. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Final%20Report%20Hydrogen%20in%20NECPs%20%28ID%209501746%29.pdf.
- Gössling, Stefan, Christiane Meyer-Habighorst, und Andreas Humpe. „A Global Review of Marine Air Pollution Policies, Their Scope and Effectiveness“. Ocean & Coastal Management 212 (15. Oktober 2021): 105824. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105824>.
- Grønt Skipsfartsprogram. „Ammoniakk som drivstoff for passasjer skip“, 6. November 2020. <https://grontskipsfartsprogram.no/pilotprosjekt/ammoniakk-som-drivstoff-i-skipsfart/>.
- Handelsblatt. „Möglicher Ersatzstoff für Gas: Ammoniak für Schiffsmotoren – hilft das dem Klimaschutz?“ Handelsblatt, 3. November 2021. <https://www.handelsblatt.com/technik/thespark/emissionen-moeglicher-ersatzstoff-fuer-gas-ammoniak-fuer-schiffsmotoren-hilft-das-dem-klimaschutz/27763362.html>.
- Hanse- und Universitätsstadt Rostock. „Haushaltsplan 2022/2023“, 2021. https://rathaus.rostock.de/media/rostock_01.a.4984.de/datei/Band%20V%20Wirtschaftspl%C3%A4ne%202022.pdf.
- Holland Marine Equipment. „Shore-Connected Power for the Ferry/Ro-Ro Vessels in the Port of Rotterdam“, 4. September 2008. <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Holland-Marine-Equipment-Shore-Connected-Power-for-the-ferry-Ro-Ro-vessels-in-the-port-of-Rotterdam.pdf>.
- Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V. „Leitprojekt TransHyDE, Vorhaben CAMPFIRE 11.1 Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen und Akzeptanzbetrachtungen grüner Ammoniak“, Februar 2021.
- International Transport Forum. ITF Transport Outlook 2021. ITF Transport Outlook. OECD, 2021. <https://doi.org/10.1787/16826a30-en>.
- Jeong, Sookhyun, Jong Hun Woo, und Daekyun Oh. „Simulation of Greenhouse Gas Emissions of Small Ships Considering Operating Conditions for Environmental Performance Evaluation“. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 12 (1. Januar 2020): 636–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.07.006>.
- Jonson, J. E., J. P. Jalkanen, L. Johansson, M. Gauss, und H. a. C. Denier van der Gon. „Model Calculations of the Effects of Present and Future Emissions of Air Pollutants from Shipping in the Baltic Sea and the North Sea“. Atmospheric Chemistry and Physics 15, Nr. 2 (22. Januar 2015): 783–98. <https://doi.org/10.5194/acp-15-783-2015>.
- Kropp, Per, Uwe Sujata, Antje Weyh, und Birgit Fritzsche. „Kurzstudie zur Beschäftigungsstruktur im Mitteldeutschen Revier“. IAB-Regional: Berichte und Analysen aus dem Regionalen Forschungsnetz. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, Januar 2019. https://doku.iab.de/regional/SAT/2019/regional_sat_0119.pdf.
- Kwon, Hyouk-Soo, Min Hyung Ryu, und Christopher Carlsten. „Ultrafine Particles: Unique Physicochemical Properties Relevant to Health and Disease“. Experimental & Molecular Medicine 52, Nr. 3 (März 2020): 318–28. <https://doi.org/10.1038/s12276->

020-0405-1.

- Leguijt, Cor, Emiel van den Toorn, Amanda Bachaus, und Chris Jongmsa. „Werk door investeringen in groene waterstof: Update en uitbreiding“. CE Delft, April 2021. https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/04/CE_Delft_200427_Werk_door_groene_waterstof_investeringen_DEF.pdf.
- Levi, Sebastian, Ingo Wolf, Christian Flachsland, Nicolas Koch, Florian Koller, und Duncan Edmondson. „Analyse: Klimaschutz und Verkehr - Zielerreichung nur mit unbequemen Maßnahmen möglich“. Ariadne-Analyse. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 21. Oktober 2021. <https://ariadneprojekt.de/publikation/klimaschutz-und-verkehr-zielerreichung-nur-mit-unbequemen-massnahmen-moeglich/>.
- Lindstad, Elizabeth, Benjamin Lagemann, Agathe Rialland, Gunnar M Gamlem, und Anders Valland. „Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels“. Transportation Research Part D: Transport and Environment 101 (2021): 103075.
- Lindstrand, Nils. „The Case for Two-Stroke Ammonia Engines“. MAN Energy Solutions. Zugegriffen 15. September 2022. <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>.
- Liu, Ming, Mengyao Yang, und Clara Ng Kay Leng. „Ammonia as a marine fuel: Bunkering, safety and release simulations“. Singapore: Nanyang Technological University, Oktober 2022. https://www.ntu.edu.sg/mesd-coe/publications#Content_C067_Col00.
- MDR Sachsen-Anhalt. „Arbeitgeber warnen vor früherem Kohleausstieg“, 28. Oktober 2021. <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/landespolitik/arbeitgeber-warnen-vor-frueherem-kohleausstieg-100.html>.
- Merten, Frank, Alexander Scholz, Christine Krüger, Simon Heck, Yann Girard, Marc Mecke, und Marius Goerge. „Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung“. Wuppertal Institut, DIW Econ, 3. November 2020. <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>.
- National Research Council (US) Committee on Acute Exposure Guideline Levels. „Ammonia Acute Exposure Guideline Levels“. In Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 6. National Academies Press (US), 2008. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207883/>.
- Naturschutzbund Deutschland. „Luftverschmutzung durch Kreuzfahrtschiffe: Ergebnisse von Luftschadstoffmessungen in Hafenstädten und an Bord von Kreuzfahrtschiffen“, März 2017. <http://imperia.verbandsnetz.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/1703-nabu-luftschadstoffmessung.pdf>.
- Navigant. „Gas for Climate: Job Creation by Scaling up Renewable Gas in Europe“, 18. November 2019. <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/03/Navigant-Gas-for-Climate-Job-creation-by-scaling-up-renewable-gas-in-Europe.pdf>.
- Norval, M, RM Lucas, AP Cullen, FR De Gruijl, J Longstreth, Y Takizawa, und JC Van Der Leun. „The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change“. Photochemical & Photobiological Sciences 10, Nr. 2 (2011): 199–225.
- Ocko, Ilissa B, und Steven P Hamburg. „Climate consequences of hydrogen leakage“. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2022, 1–25.
- Olling, Jakob. „Scandlines-færge tester sparetrick - udstyres med 30 meter højt sejl“. TV2 ØST. Zugegriffen 13. September 2022. <https://www.tv2east.dk/guldborgsund/faerge-i-rutefart-skal-teste-sparetrick-udstyret-med-saerligt-sejl>.
- Ostsee-Zeitung. „TV-Doku zeigt: So verschmutzen Kreuzfahrtschiffe die Luft in Rostock-Warnemünde“, 22. Juli 2019. <https://www.ostsee-zeitung.de/mecklenburg-vorpommern/tv-doku-zeigt-so-verschmutzen-kreuzfahrtschiffe-die-luft-in-warne-muende-FSTOWJBULNOK37KGTE4HDRS7LU.html>.
- Ram, Manish, Dmitrii Bogdanov, Arman Aghahosseini, Ashish Gulagi, Solomon Oyewo, Michael Child, Upeksha Caldera, u. a. Global Energy System Based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. LUT University, Energy Watch Group, 2019. https://www.researchgate.net/publication/332865382_Global_Energy_System_based_on_100_Renewable_Energy_-_Power_Heat_Transport_and_Desalination_Sectors.
- Ram, Manish, Juan Carlos Osorio-Aravena, Arman Aghahosseini, Dmitrii Bogdanov, und Christian Breyer. „Job Creation during a Climate Compliant Global Energy Transition across the Power, Heat, Transport, and Desalination Sectors by 2050“. Energy

- 238 Part A (1. Januar 2022). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221019381>.
- Ramacher, Martin Otto Paul, Volker Matthias, Armin Aulinger, Markus Quante, Johannes Bieser, und Matthias Karl. „Contributions of Traffic and Shipping Emissions to City-Scale NOx and PM2.5 Exposure in Hamburg“. Atmospheric Environment 237 (15. September 2020): 117674. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117674>.
- Rostock Port. „Statistiken“. Zugegriffen 13. September 2022. <https://rostock-port.de/hafen-rostock/statistiken>.
- Rostock Port GmbH. „Nachhaltigkeitsbericht 2020“. Rostock, Dezember 2021. <https://www.rostock-port.de/fileadmin/Media/Projekte/Nachhaltigkeitsbericht.pdf>.
- Scandlines. „M/F Copenhagen“, Juni 2020.
- Scandlines Infrastructure ApS. „Annual report and sustainability report“, 2021. <https://www.scandlines.com/about-us/management-and-investors/annual-report-and-sustainability-report/>.
- Schraufnagel, Dean. „The Health Effects of Ultrafine Particles“. Experimental & Molecular Medicine 52, Nr. 3 (März 2020): 311–17. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>.
- Sillman, Dr Sanford. „Overview: Tropospheric Ozone, Smog and Ozone-NOx-VOC Sensitivity.“, 2003, 8.
- Smith, Martin J., Oluwafisayo Alabi, Nick Hughes, Paul Dodds, Karen Turner, und John T. S. Irvine. The Economic Impact of Hydrogen and Fuel Cells in the UK – a Preliminary Assessment Based on Analysis of the Replacement of Refined Transport Fuels and Vehicles. London, UK: H2FC SUPERGEN, 2017. http://www.h2fcsupergen.com/wp-content/uploads/2015/08/J5214_H2FC_Supergen_Economic_Impact_report_WEB.pdf.
- Sofiev, Mikhail, James J. Winebrake, Lasse Johansson, Edward W. Carr, Marje Prank, Joana Soares, Julius Vira, Rostislav Kouznetsov, Jukka-Pekka Jalkanen, und James J. Corbett. „Cleaner Fuels for Ships Provide Public Health Benefits with Climate Tradeoffs“. Nature Communications 9, Nr. 1 (6. Februar 2018): 406. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02774-9>.
- Statistics Norway. „Emission factors used in the estimations of emissions from combustion“. SSB, November 2021. <https://www.ssb.no/attachment/404602/>.
- Umweltbundesamt. „Ammoniak“, 23. Juni 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/ammoniak#emittenten-quellen-fur-ammoniak-in-der-landwirtschaft>.
- . „Ammoniak, Geruch und Staub“, 22. Juli 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/ammoniak-geruch-staub#emissionen-der-landwirtschaft>.
- . „Fragen und Antworten: Ultrafeine Partikel“. Text. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, 12. Dezember 2018. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/feinstaub/fragen-antworten-ultrafeine-partikel>.
- . „Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland durchschnittlich?“ Text. Umweltbundesamt, 23. Juni 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hoch-sind-die-treibhausgasemissionen-pro-person>.
- United States Environmental Protection Agency. „Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks“, 14. April 2022. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>.
- US Department of Homeland Security, Home Science and Technology Directorate. „Securing Transportation of Ammonia—Agricultural Lifeline and Future Affordable, Clean Energy Source“, 17. Juni 2021. <https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2021/06/17/feature-article-securing-transportation-ammonia>.
- Vohra, Karn, Alina Vodonos, Joel Schwartz, Eloise A. Marais, Melissa P. Sulprizio, und Loretta J. Mickley. „Global Mortality from Outdoor Fine Particle Pollution Generated by Fossil Fuel Combustion: Results from GEOS-Chem“. Environmental Research 195 (1. April 2021): 110754. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754>.
- Wärtsilä Corporation. „World’s First Full Scale Ammonia Engine Test - an Important Step towards Carbon Free Shipping“, 30. Juni 2020. <https://www.wartsila.com/media/news/30-06-2020-world-s-first-full-scale-ammonia-engine-test---an-important-step-towards-carbon-free-shipping-2737809>.

Williamson, Craig E, Patrick J Neale, Samuel Hylander, Kevin C Rose, Félix L Figueroa, Sharon A Robinson, Donat-P Häder, Sten-Åke Wängberg, und Robert C Worrest. „The interactive effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and climate change on aquatic ecosystems“. *Photochemical & Photobiological Sciences* 18, Nr. 3 (2019): 717–46.

„WIR CAMPFIRE“. Zugegriffen 30. September 2022. <https://wir-campfire.de/>.

Wisløff, Karl, und Erlend Nervold. „Report for pilot “Ammonia as Fuel”“. *Green Shipping Programme*, 10. August 2021.

Zhang, Qianqian, Yuepeng Pan, Yuexin He, Wendell W. Walters, Qianyin Ni, Xuyan Liu, Guangyi Xu, Jiali Shao, und Chunlai Jiang. „Substantial Nitrogen Oxides Emission Reduction from China Due to COVID-19 and Its Impact on Surface Ozone and Aerosol Pollution“. *Science of The Total Environment* 753 (20. Januar 2021): 142238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142238>.

IKEM